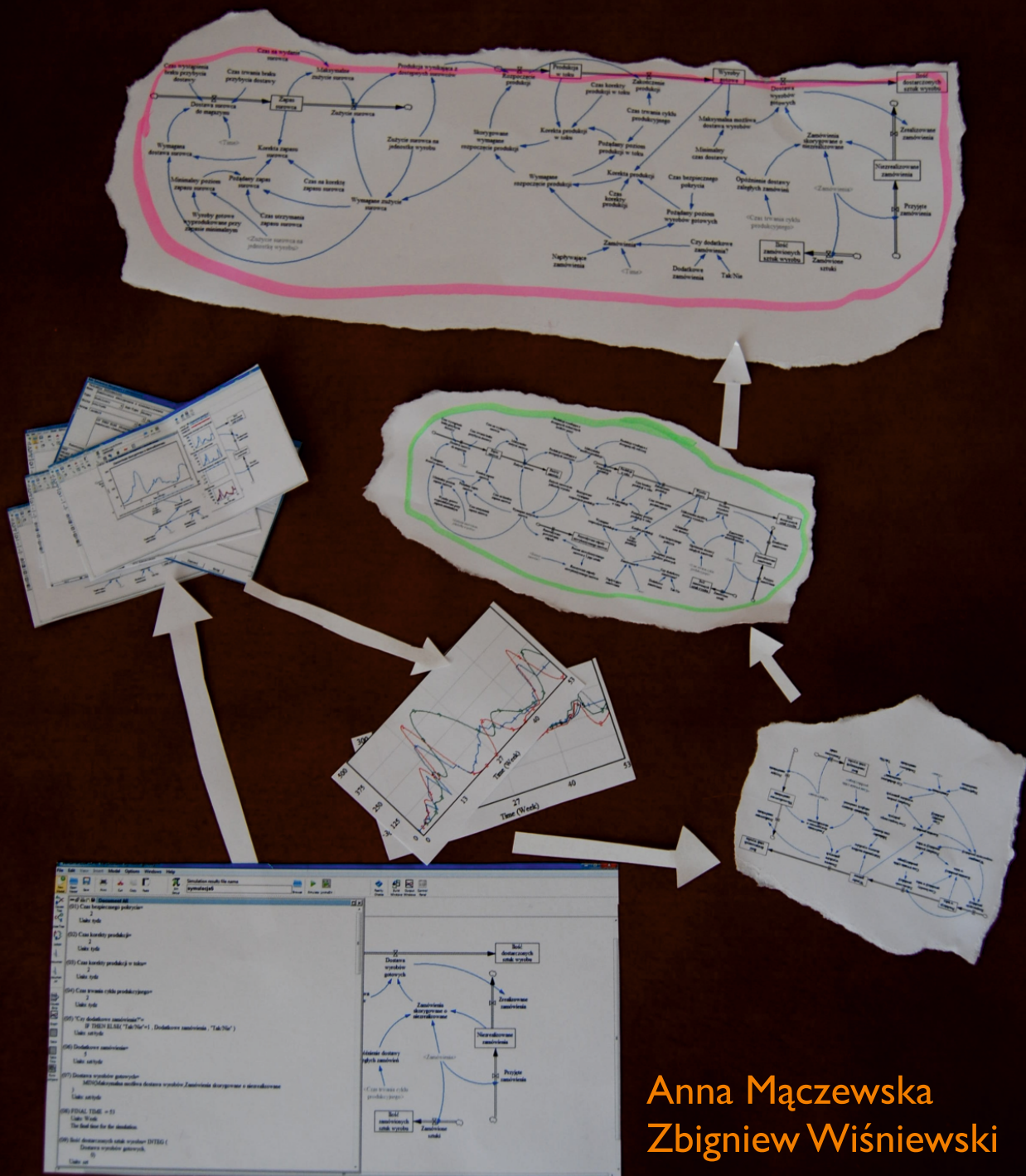


Model symulacyjny przedsiębiorstwa o produkcji małoseryjnej w konwencji dynamiki systemów dla układu zaopatrzenie - produkcja - zbyt



Anna Mączewska
Zbigniew Wiśniewski

Anna Mączewska
Zbigniew Wiśniewski

Model symulacyjny przedsiębiorstwa o produkcji
małoseryjnej w konwencji dynamiki systemów
dla układu zaopatrzenie – produkcja – zbyt

Monografie Politechniki Łódzkiej
Łódź 2016

Recenzenci:

prof. dr hab. inż. Józef Matuszek
dr hab. inż. Andrzej Szymonik, prof. PŁ

Redaktor Naukowy Wydziału Organizacji i Zarządzania
prof. dr hab. inż. Jerzy Lewandowski

© Copyright by Politechnika Łódzka 2016

Projekt okładki
Maria Wiśniewska

WYDAWNICTWO POLITECHNIKI ŁÓDZKIEJ
90-924 Łódź, ul. Wólczańska 223
tel. 42 631-29-52, 42 631-20-87
fax 42 631-25-38
e-mail: zamowienia@info.p.lodz.pl
www.wydawnictwa.p.lodz.pl

ISBN 978-83-7283-827-8

Nakład 50 egz. Ark. druk. 7,0. Papier offset. 80g, 70 x 100
Druk ukończono w grudniu 2016 r.
Wykonano w Drukarni „Quick-Druk” s.c., 90-562 Łódź, ul. Łąkowa 11
Nr 2215

SPIS TREŚCI

1. WPROWADZENIE DO DYNAMIKI SYSTEMÓW	5
2. WYBRANE ASPEKTY ZARZĄDZANIA PRODUKCJĄ	13
2.1. Miejsce systemu produkcyjnego w systemie gospodarczym	13
2.1.1. Procesy systemu produkcyjnego	15
2.1.2. Układ sterowania produkcją	15
3. ROZWIĄZYWANIE ZAGADNIEŃ DYNAMIKI SYSTEMÓW	17
3.1. Istota dynamiki systemów	17
3.2. Rola myślenia systemowego w rozwiązywaniu systemów	18
3.3. Modele systemów i ich rodzaje	20
3.4. Symulacja systemów	23
3.5. Programy symulacyjne wykorzystywane w dynamice systemów	24
4. MODEL SYMULACYJNY PRZEDSIĘBIORSTWA W UJĘCIU DYNAMICZNYM	27
4.1. Podstawa modelu produkcja – zbył	27
4.1.1. Modyfikacja <i>Zamówień</i> oraz ograniczenie <i>Rozpoczęcia produkcji</i>	32
4.1.2. Modyfikacja z zastosowaniem <i>Korekty produkcji w toku</i>	37
4.2. Model produkcja – zbył z uwzględnieniem niezrealizowanych zamówień	45
4.3. Podstawa modelu zaopatrzenie – produkcja – zbył	49
4.3.1. Model z uwzględnieniem zaopatrzenia w przedmioty pracy – stała wartość dostępnych surowców	50
4.3.2. Model z uwzględnieniem zaopatrzenia w przedmioty pracy – zmienna wartość dostępnych surowców	55
4.4. Model zaopatrzenie – produkcja – zbył	72
5. ZAKOŃCZENIE	88
6. BIBLIOGRAFIA	95
SPIS RYSUNKÓW	98
SPIS TABEL	101

1. WPROWADZENIE DO DYNAMIKI SYSTEMÓW

Celem opracowania jest zbudowanie modelu przedsiębiorstwa produkcyjnego o produkcji małoseryjnej w ujęciu zaopatrzenia, produkcji i zbytu, przeprowadzanie symulacji z jednoczesną weryfikacją i walidacją powstającego modelu. Budowa uniwersalnego modelu firmy z użyciem programu symulacyjnego pozwoli na przewidzenie wyników planowanych lub już rozpoczętych, działań związanych z zaopatrzeniem, produkcją i zbytem. W dalszej części zostanie przedstawiona budowa modelu symulacyjnego z użyciem programu VENSIM, przeprowadzenie symulacji i analiza wyników oraz ocena jakości zbudowanego modelu i propozycje usprawnień.

Rozwój szeroko pojętej informatyki pozwolił spopularyzować praktyczne użycie metod, których koncepcje powstały zanim dało się je powszechnie stosować. Jedną z nich jest modelowanie systemów z zastosowaniem konwencji dynamiki systemów (ang. *system dynamics*). Na początku lat 60. XX wieku została wydana książka pt. *Industrial Dynamics*, autorstwa Jaya W. Forrester, dotycząca symulacji modeli opisujących problemy zarządzania i problemy gospodarcze. Przy pisaniu tej książki, Forrester potrzebował pomocy przy przeprowadzaniu symulacji komputerowych. Poproszony o to programista, Richard Bennet, stworzył kompilator automatycznie tworzący kod dla rozwiązywanego układu równań. Modele Forrestera w istocie przypominały układy równań różniczkowych. Powstały w ten sposób kompilator nazwano SIMPLE (ang. *Simulation of Industrial Management Problems with Lots of Equations* – Symulacja problemów zarządzania przemysłem przy wykorzystaniu dużej liczby równań). Stanowiło to podstawę do wprowadzenia języka symulacji DYNAMO, a z biegiem czasu kolejnych, coraz prostszych wersji dla niewyspecjalizowanych użytkowników.

Programy symulacyjne wykorzystywane są obecnie do modelowania i badania różnych zjawisk, które można pojmować jako system, z wielu dziedzin, np. socjologii, ekonomii. Zagadnienie modelowania przedsiębiorstw pochodzi z pogranicza technik informatycznych oraz zarządzania i inżynierii produkcji.

Sposób myślenia systemowego i znajdowania elementów składowych oraz ich powiązań przedstawił w bardzo przejrzysty, niemal popularyzatorski sposób Peter M. Senge w książce *Pięta dyscyplina. Teoria i praktyka organizacji uczących się*, wydanej w 2012 roku. Jednakże książką, stanowiącą ważne oparcie i punkt odniesienia dla wielu autorów, jest *Business Dynamics: Systems Thinking and Modeling for a Complex World*, wydana w 2000 roku przez wydawnictwo Irwin/McGraw Hill. Autorem jest John D. Sterman, profesor i dyrektor MIT

Sloan School of Management, którego uznaje się obecnie za lidera szkoły dynamiki systemów.

Myślenie systemowe zostało wykorzystane w różnych aspektach związanych z produkcją. Jeden z czołowych brytyjskich ekspertów zarządzania łańcuchem dostaw, Martin Christopher stwierdził, iż współzawodnictwo w XXI wieku nie toczy się między przedsiębiorstwami, a między łańcuchami dostaw¹.

Tabela 1.1. Klasyfikacja badań i rozwoju w modelowaniu dynamiki systemów w zarządzaniu łańcuchem dostaw

Kategoria Obszar badań	Badanie: modelowanie w celu budowania teorii	Praktyka: modelowanie w celu rozwiązania problemu	Zastosowanie badań praktyce: rozwijanie podejścia przezmodelowanie
Zarządzanie zasobami	(b)	(b), (c)	
Wzmocnienie popytu	(b)	(b)	
Reengineering łańcucha dostaw		(a), (b), (c)	(a), (b), (c)
Projektowanie łańcucha dostaw	(a)	(a), (b), (c)	(a), (b), (c)
Zarządzanie międzynarodowym łańcuchem dostaw	(a)	(a), (b), (c)	(a), (b), (c), (d)
Stosowane techniki i metody: (a) diagramy pętli przyczynowych (b) symulacja ciągła (c) techniki badań operacyjnych (d) symulacja dyskretna			

Źródło: opracowanie własne na podstawie: B.J. Angerhofer, M.C. Angelides, *System dynamics modelling in supply chain management: research review*, Winter Simulation Conference, 2000, s. 344.

Praca Bernharda J. Angerhofera i Mariosa C. Angelidesa pt. *System dynamics modelling in supply chain management: research review*, przedstawiona na Zimowej Konferencji Symulacji (ang. *Winter Simulation Conference*) w 2000 roku, jest z kolei przeglądem możliwości zastosowań *system dynamics* w zarządzaniu łańcuchem dostaw (ang. *Supply Chain Management – SCM*). Podaje m.in. pięć obszarów (zarządzanie zasobami, wzmocnienie popytu, reengineering łańcucha dostaw, projektowanie łańcucha dostaw, zarządzanie międzynarodowym łańcuchem dostaw), trzy kategorie zastosowań (badanie – modelowanie w celu budowania teorii, praktyka – modelowanie w celu rozwiązania problemu, zastosowanie

¹ Y. Feng, *System Dynamics Modeling for Supply Chain Information Sharing*, „Physics Procedia”, 2012, 25, s. 1463.

badan w praktyce – rozwijanie podejścia przez modelowanie) oraz klasyfikuje, jakie metody i techniki są używane w konkretnym obszarze i przy danym zastosowaniu. Przedstawione zostało to w tabeli 1.1.

Artykuł z Zimowej Konferencji Symulacji w 2006 roku, którego autorami są Seza Orcun, Reha Uzsoy i Karl Kempf, pt. *Using system dynamics simulations to compare capacity models for production planning*, jest przeglądem różnych metod obliczania zasobów gotowego wyrobu. Zastosowano m.in. opóźnienie o stałą jednostkę, opóźnienie materiałowe (wykładnicze) pierwszego stopnia, opóźnienie materiałowe (wykładnicze) trzeciego stopnia, opóźnienie rozmytego minimum, opóźnienie materiałowe (wykładnicze) pierwszego stopnia, biorące pod uwagę limit wydajności produkcji.

Patroklos Georgiadis i Charalampos Michaloudis² zajęli się produkcją w systemie gniazdowym (ang. *job-shop*). W ich modelu obecne są dwie pętle odpowiedzialne za aktualną produkcję i zamówienia zalegające. Wprowadzono także współczynniki odpowiadające za różnice między pożądanymi a rzeczywistymi wielkościami produkcji w toku i wyrobami opóźnionymi w produkcji. Z pomocą programów komputerowych określono optymalne wartości tych współczynników dla zastosowanych danych produkcyjnych. Z kolei Mustafa Özbayrak, Theopisti C. Papadopoulou i Melek Akgun³ pracowali nad przepływami materiału i informacji, pomijając aspekt finansowy. Zaproponowany model zastosowano w średnim przedsiębiorstwie zajmującym się produkcją na zamówienie. Obserwując m.in. czynnik zadowolenia klienta, zależny od ilości otrzymanego produktu, wprowadzono osiem zmian w modelu, które dotyczyły: zwiększenia i zmniejszenia popytu, zwiększenia i zmniejszenia częstotliwości zmian popytu, zwiększenia czasu produkcji, awarii urządzeń produkcyjnych, niepełne dostawy od dostawcy, dzielenie informacji o popycie między detalistą a producentem. W obu powyższych artykułach ilość zamówień niezrealizowanych obliczana jest na tej samej zasadzie, jaką zastosowano w niniejszym opracowaniu. Wpływem dzielenia informacji na działanie przedsiębiorstw w łańcuchu dostaw zajął się Yang Feng⁴, co zostało zaprezentowane w 2012 roku na Międzynarodowej konferencji urządzeń półprzewodnikowych i materiałoznawstwa (ang. *International Conference on Solid State Devices and Materials Science*). Stosując trójpoziomowy model łańcucha dostaw (producent, dystrybutor, detalista)

² P. Georgiadis, Ch. Michaloudis, *Real-time production planning and control system for job-shop manufacturing: A system dynamics analysis*, „European Journal of Operational Research”, 2012, 216, ss. 94-104.

³ M. Özbayrak, T.C. Papadopoulou, M. Akgun, *Systems dynamics modelling of a manufacturing supply chain system*, „Simulation Modelling Practice and Theory”, 2007, 15, ss. 1338-1355.

⁴ Y. Feng, *System Dynamics Modeling for Supply Chain Information Sharing*, „Physics Procedia”, 2012, 25, ss. 1463-1469.

zaprezentował pozytywny wpływ dzielenia informacji dotyczących popytu każdego z ogniw łańcucha z pozostałymi ogniwami. O wadach takiego rozwiązania, jak koszty wdrożenia i użytkowania, brak odpowiedniego organizacyjnego przygotowania przedsiębiorstw, zostało wspomniane w artykule M. Özbayraka, T. C. Papadopolou i M. Akguna. Praca Fenga obrazuje również działanie tzw. efektu byczego bicia (ang. *bullwhip effect*), czyli zniekształcenia popytu, które nasilają się wraz z przesuwaniem się w górę łańcucha dostaw. Z efektem tym można zapoznać się także w tzw. grze piwnej (ang. *Beer Game*), która została wymyślona w latach 60. XX wieku w MIT Sloan School of Management. Zasady gry, jej najbardziej popularny przebieg wynikający ze struktury systemu i ludzkich modeli myślowych, zostały opisane we wcześniej wspomnianej pozycji autorstwa Senge'a⁵. Więcej informacji na temat tej gry oraz darmową licencję na aplikację do użytku w szkolnictwie wyższym można uzyskać pod adresem <http://www.beergame.org>, dostęp z dnia 22.12.2015 r.

Zha Xianjin i Yan Mi to autorzy artykułu pt. *System Dynamics Modeling for Customer-Production-Sale in Supply Chain*, zaprezentowanego w 2006 roku podczas Międzynarodowej konferencji zarządzania logistyką i łańcuchem dostaw (ang. *International Conference on Management of Logistics and Supply Chain*). Jako rdzeń łańcucha dostaw opisują oni klientów, produkcję i sprzedaż. W ich podejściu brak jest uwzględnienia zaległych zamówień. Badają wpływ zmiany stałych: kosztów logistycznych, reklamowych i oczekiwanego zysku, na ilość uzyskanych klientów. Kolejna ważna dla prezentowanego w niniejszym opracowaniu sposobu modelowania praca poświęcona tym razem kwestii finansowej została stworzona przez czwórkę autorów: B. Kiyani, P. Shahnazari-Shahrezaei, H. Kazemipoor i M. Fallah⁶. Model przez nich zaproponowany, na podstawie którego wyliczana jest wartość bieżąca netto przedsiębiorstwa, uwzględnia m.in. siłę roboczą oraz ponoszone na nią koszty, wielkość produkcji i przychody z jej tytułu, koszty transportu.

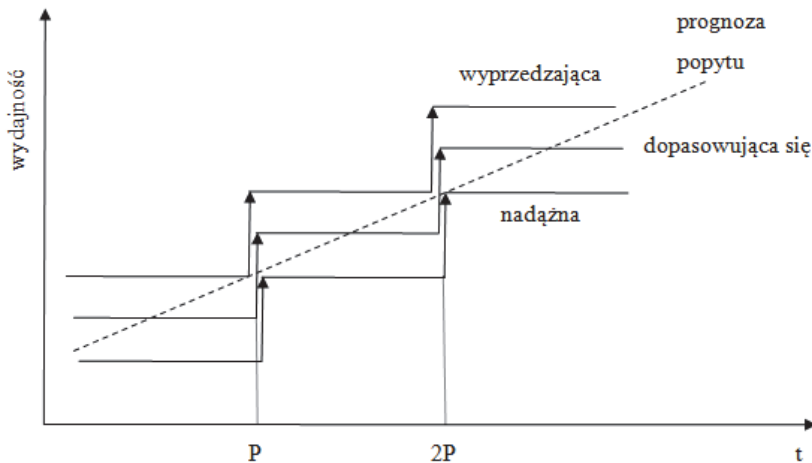
Kolejne trzy ważne artykuły poświęcone zostały tematom związanym z ekologią, powtórным przetworzeniem wyeksploatowanych wyrobów, stworzeniem wizji danego przedsiębiorstwa jako przyjaznego środowiska (ang. *Green Image*). Autorzy pierwszego z nich, Saeed Rahimpour Golroudbary i Seyed Mojib Zahraee⁷, określili „czynnik zielonego wizerunku” (ang. *Green Image Factor*)

⁵ P.M. Senge, *Pięta dyscyplina. Teoria i praktyka organizacji uczących się*, wyd. VI poszerz., Oficyna a Wolters Kluwer business, Warszawa 2012, ss. 45-61.

⁶ B. Kiyani, P. Shahnazari-Shahrezaei, H. Kazemipoor, M. Fallah, *Dynamic modeling to determine production strategies in order to maximize net present worth in small and medium size companies*, „Journal of Industrial Engineering International”, 2010, 6 (11), ss. 51-64.

⁷ S.R. Golroudbary, S.M. Zahraee, *System dynamics model for optimizing the recycling and collection of waste material in a closed-loop supply chain*, „Simulation Modelling Practice and Theory”, 2015, 53, ss. 88-102.

jako stosunek ilości wyrobów zrecyklingowanych do sprzedanych, a stopień satysfakcji klienta uzależnili od procentowej ilości niezrealizowanych zamówień. W wyniku badań, aby osiągnąć zadowalająco wysokie wartości obu tych czynników, zmniejszono czas dostawy i wprowadzono centrum zbierania wyrobów zużytych, które gwarantuje zebranie wszystkich takich produktów od klientów. Dimitrios Vlachos, Patroklos Georgiadis, Eleftherios Iakovou⁸ określili *Green Image* jako czynnik wpływający na wielkość sprzedaży. Podobnie jak autorzy poprzedniego artykułu, nie uznają wszystkich zebranych zużytych wyrobów jako nadających się do regeneracji i powtórnej sprzedaży. W stworzonym przez nich modelu występują parametry, przez które modelujący może zmieniać czas „P”, co jaki ma być sprawdzana ilość zebranych zużytych wyrobów oraz tych nadających się do regeneracji, a także politykę reakcji na prognozę popytu „K”, jaka ma być stosowana w przypadku ich wykorzystywania. Możliwe są trzy reakcje na te prognozy: wyprzedzająca, dopasowująca się i nadążna. Na rysunku 1.1 przedstawiono graficzną interpretację tych strategii. Podczas badań wyliczano wartość bieżącą netto, zmieniającą się podczas zmieniania m.in. czterech wyżej opisanych parametrów.



Rys. 1.1. Typy reakcji na prognozy popytu

Źródło: opracowanie własne na podstawie: D. Vlachos, P. Georgiadis, E. Iakovou, *A system dynamics model for dynamic capacity planning of remanufacturing in closed-loop supply chains*, „Computers & Operations Research”, 2007, 34, s. 371.

⁸ D. Vlachos, P. Georgiadis, E. Iakovou, *A system dynamics model for dynamic capacity planning of remanufacturing in closed-loop supply chains*, „Computers & Operations Research”, 2007, 34, ss. 367-394.

Roberto Poles⁹, podobnie jak autorzy poprzednich prac, bierze pod uwagę kumulację niezrealizowanych i aktualnych zamówień, jednak nie wprowadza on żadnej wielkości mającej związek z pozytywnym wizerunkiem przedsiębiorstwa czy z badaniem zadowolenia klientów.

Dwa następne artykuły dotyczą produkcji z nastawieniem na branżę spożywczą (mięsna, hodowla i ubój świń oraz drobiu). Autorzy pierwszego z nich, Shotaro Mingegishi i Daniel Thiel¹⁰, stwierdzają, że w przypadku tego typu przemysłu raz rozpoczęty proces produkcyjny jest nieodwracalny. Problemem są wahania poziomu inwentarza zwierzęcego w perspektywie krótkoterminowej, które są groźne dla osiągnięcia pożądanej ilości produkcji, mimo wyznaczania średnio-terminowych (w przypadku drobiu na kilka miesięcy w przód) prognoz popytu. Dodatkowo, produkt po przejściu przez cały proces produkcyjny, ma bardzo krótki okres przydatności. Sam łańcuch autorzy dzielą na dwie części, które działają w dwóch systemach: okres hodowli (system pchający; ilość potrzebnego wyrobu jest określana według prognoz) i okres uboju (system ssący; produkcja odbywa się na zamówienie). K. Piewthongngam, P. Vijitnopparat, S. Pathumnakul, S. Chumpatong oraz M. Duangjinda¹¹ w swojej pracy zajmują się hodowlą i ubojem świń. Jako znaczący aspekt przy budowie tego modelu uznano kolejne pokolenia zwierząt, liczebność stada oraz jego kontrolę, a także płęć prosiaków.

Interesującą pozycją jest również artykuł trójki autorów: Deogratias Kibira, Sanjay Jain i Charles R. McLean¹². Nie zajmują się oni budowaniem modelu, a jedynie rozważają elementy z czterech wzajemnie na siebie oddziaływujących dziedzin (finanse, środowisko, społeczność i wytwórczość). Niektóre z tych elementów można rozważać szczegółowo, jak np. chorych i zdrowych pracowników oraz ich wzajemny wpływ na swoje bezpieczeństwo, istnienie jedno- i wieloosobowych gospodarstw domowych z ich wpływem na lokalną ekonomię, wpływ podatków na rozwój przemysłu czy oddziaływanie zanieczyszczeń na florę i faunę.

Wśród publikacji rodzimych autorów warto zwrócić uwagę na książkę Ryszarda Łukaszewicza pt. *Dynamika systemów zarządzania*, wydaną w 1975 roku przez Państwowe Wydawnictwo Naukowe. Opisuje on pogląd na dynamikę

⁹ R. Poles, *System dynamics modeling of a production and inventory system for remanufacturing to evaluate system improvement strategies*, „International Journal Production Economics”, 2013, 144, ss. 189-199.

¹⁰ S. Mingegishi, D. Thiel, *System dynamics modeling and simulation of a particular food supply chain*, „Simulation Practice and Theory”, 2000, 8, ss. 321-339.

¹¹ K. Piewthongngam, P. Vijitnopparat, S. Pathumnakul, S. Chumpatong, M. Duangjinda, *System dynamics modelling of an integrated pig production supply chain*, „Biosystems Engineering”, 2014, 127, ss. 24-40.

¹² D. Kibira, S. Jain, Ch. R. McLean, *A System Dynamics Modeling Framework for Sustainable Manufacturing*, „Proceedings of the 27th Annual System Dynamics Society Conference”, 2009.

systemów, zasady tworzenia modeli w tym podejściu i badań za ich pomocą, obejmując głównie obszar produkcji i zbytu. W tej konwencji Paweł Żukowski stworzył model organizacji gospodarczej w artykule pt. *Model i symulacja dynamiki systemu zarządzania organizacją gospodarczą (ujęcie modelowe)*. Felician Rydzak i Edward Chlebus są autorami książki pt. *Dynamic Model Based Resilience Analysis in Production Systems*, w której do symulacji i analizy jednym z używanych programów do modelowania przedsiębiorstwa jest Vensim.

Marzena Kramarz¹³ jest autorką pracy dotyczącej wykorzystania podwykonawstwa w przemyśle hutniczym. Oprócz budowy modelu, zajmuje się ona zasadami udanego partnerstwa między organizacjami, ich stymulatorami i przeszkodami.

Małgorzata Baran¹⁴ zajmuje się modelem dostosowania wielkości zatrudnienia do potrzeb produkcyjnych przedsiębiorstwa średniej wielkości, produkującego pod zamówienia. Dopasowuje model z biblioteki programu Vensim do rzeczywistych warunków funkcjonowania przedsiębiorstwa, uwzględniając zmienną pracochłonność dla trzech typów wyrobu. Kontynuację tej pracy zawarła w kolejnej publikacji¹⁵, gdzie oddzielnie liczy liczbę wymaganych pracowników do produkcji konkretnego (jednego z trzech) wzoru spodni, gdzie każdy z wzorów wyróżnia się inną pracochłonnością.

Ta sama autorka, wraz z Justyną Stecko, badała modele poświęcone symulacji łańcucha dostaw w małej firmie w branży fotograficznej z ograniczeniem zasobów surowców i siły roboczej. W jednej z ich prac¹⁶ został poruszony temat gospodarki materiałowej. Stworzono dwa modele, każdy odpowiadający dwóm typom surowców, które symulują ich zużywanie i dostawy, a w efekcie możliwości produkcyjne wynikające z dostępności obu typów surowców. W poprzednich publikacjach M. Baran aspekt dostępności surowców nie występował w modelach, zakładano, że są one niewyczerpalne. Kolejny z artykułów obu pań¹⁷ można uznać za uzupełniający ich poprzedni model, chociaż modele powstałe w ramach obu prac funkcjonują niezależnie od siebie. Zajmują się w nim symu-

¹³ M. Kramarz, *Modelowanie podwykonawstwa w sieci dystrybucji z odroczoną produkcją*, „Prace naukowe Politechniki Warszawskiej – Transport”, 2012, nr 84, ss. 55-67.

¹⁴ M. Baran, *Zastosowanie metody Dynamiki Systemów w przedsiębiorstwie odzieżowym*, [w:] W. Gonciarski, P. Zaskórski (red.), *Wybrane koncepcje i metody zarządzania początku XXI wieku*, Wojskowa Akademia Techniczna, Warszawa 2009, ss. 239-249.

¹⁵ M. Baran, *Rozwinięcie symulacyjnego modelu dostosowania zatrudnienia do potrzeb produkcyjnych przedsiębiorstwa alfa w konwencji dynamiki systemów*, „Zeszyty naukowe Politechniki Rzeszowskiej – Zarządzanie i Marketing”, 2010, 17, (4/2010), ss. 9-16.

¹⁶ M. Baran, J. Stecko, *Symulacyjny model gospodarki – przypadek przedsiębiorstwa fotosystem*, „Humanities and Social Sciences”, 2013, XVIII, (2/2013), ss. 27-40.

¹⁷ M. Baran, J. Stecko, *Symulacyjny model produkcja – zbytu w konwencji metody dynamiki systemów przypadek przedsiębiorstwa Fotosystem*, „Modern Management Review”, 2014, XIX/21, (1/2014), ss. 7-23.

lowaniem produkcji i zbytu, gdzie biorą pod uwagę niezrealizowane zamówienia oraz uzależniają możliwości produkcyjne od dostępnych zasobów surowców i siły roboczej (obie wartości podane jako stałe). Co ciekawe, w swoich pracach autorki podczas tworzenia modeli posłużyły się modelami opracowanymi i omówionymi przez Stermana¹⁸.

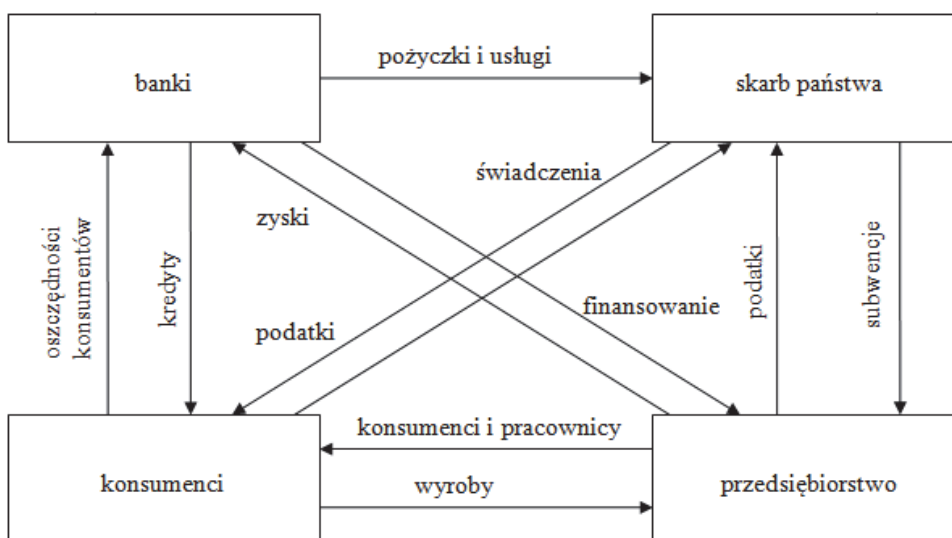
Przywołane środowisko symulacyjne Vensim jest bardzo często używanym narzędziem, głównie z uwagi na jego dostępność i stosunkowo dużą prostotę obsługi przy bardzo zaawansowanych możliwościach. Wykorzystanie narzędzia ułatwia książka Krzysztofa Krupy pt. *Modelowanie, symulacja i prognozowanie. Systemy ciągłe*, wydana w 2008 roku nakładem Wydawnictw Naukowo-Technicznych.

¹⁸ J. D. Sterman, *Business Dynamics: Systems Thinking and Modeling for a Complex World*, Irwin/McGraw-Hill, Boston 2000.

2. WYBRANE ASPEKTY ZARZĄDZANIA PRODUKCJĄ

2.1. Miejsce systemu produkcyjnego w systemie gospodarczym

Aby badać zjawiska zachodzące w przedsiębiorstwie produkcyjnym należy uświadomić sobie, jakie jest jego miejsce w systemie gospodarczym, w którym stanowi on jeden z jego podmiotów. Na rysunku 2.1 przedstawiono umiejscowienie przedsiębiorstwa oraz najważniejsze relacje z innymi podmiotami, jak skarb państwa, banki oraz klienci. Klienci stanowią również jednocześnie siłę roboczą przedsiębiorstw. Przedsiębiorstwa wchodzą także w interakcje między sobą, będąc dla siebie zewnętrznymi dostawcami i klientami.



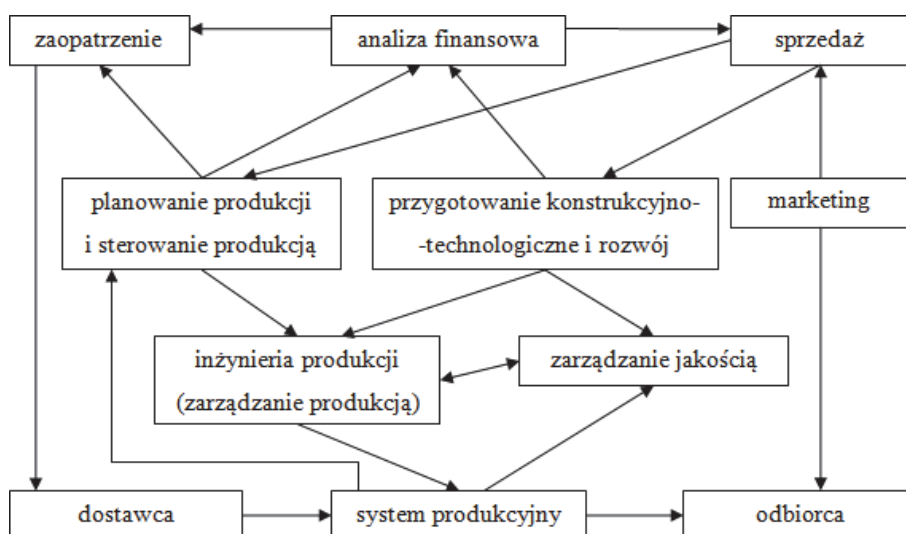
Rys. 2.1. System gospodarczy

Źródło: opracowanie własne na podstawie: E. Pająk, Zarządzanie produkcją. Produkt, technologia, organizacja, Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa 2006, s. 10.

W przedsiębiorstwie produkcyjnym może być więcej niż jeden systemów produkcyjnych, zależnie od profilu działalności. Systemy te mogą być zarazem dla siebie wewnętrznymi dostawcami i klientami. System produkcyjny można przedstawić zgodnie z rysunkiem 3.4, gdzie na wyjściu $y(t)$ otrzymujemy gotowy wyrób, usługi produkcyjne, braki produkcyjne, surowce wtórne, odpady i informacje (o jakości wyrobu, kosztach produkcji, doświadczeniu załogi). Niezbędne do tej transformacji T są wszelkie zasoby (wejścia $x(t)$), takie jak:

- czynniki energetyczne – np. woda, paliwa, gazy, energia elektryczna;
- informacje – np. dotyczące gotowego wyrobu, sposobów prowadzenia procesu technologicznego, doświadczenie pracowników;
- kadra;
- przedmioty pracy – np. surowce, półfabrykaty;
- środki finansowe, w tym kapitał zamrożony;
- techniczne środki produkcji – np. budynki, maszyny, narzędzia^{19,20}.

Oprócz systemu produkcyjnego, w przedsiębiorstwie wyróżnić można inne systemy, z którymi przykładowe związki przedstawione zostały na rysunku 2.2. Wszelkie działania zarządcze, czyli planowanie, organizowanie, sterowanie i motywowanie oraz kontrolowanie, wpływają na każdy z systemów i zależą od informacji, które z tych systemów napływają.



Rys. 2.2. Przykład związków między systemem produkcyjnym i innymi systemami przedsiębiorstwa

Źródło: opracowanie własne na podstawie: E. Pająk, *Zarządzanie produkcją. Produkt, technologia, organizacja*, Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa 2006, s. 13.

¹⁹ E. Pająk, *Zarządzanie produkcją. Produkt, technologia, organizacja*, Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa 2006, ss. 11-12.

²⁰ K. Pasternak, *Zarys zarządzania produkcją*, Polskie Wydawnictwo Ekonomiczne, Warszawa 2005, s. 90.

2.1.1. Procesy systemu produkcyjnego

Aby system przekształcił wektor (strumień) wejściowy $x(t)$ w wektor (strumień) wyjściowy $y(t)$, w systemie muszą zajść pewne procesy. Rozważając model przedsiębiorstwa produkcyjnego, oczywistym jest, że procesem dominującym w tym przypadku jest proces produkcyjny, na który składają się kolejne procesy, które można różnie zaklasyfikować. Edward Pająk, powołując się na Ireneusza Durlika, rozróżnia w nich trzy główne: badań i rozwoju, dystrybucji i obsługi, wytwórczy (który z kolei dzieli na wytwórczy podstawowy, wytwórczy pomocniczy i obsługi wytwarzania, gdzie proces wytwórczy podstawowy w jednym systemie produkcyjnym, może stanowić w innym proces wytwórczy pomocniczy)^{21,22}. Z kolei według Bolesława Liwowskiego i Remigiusza Kozłowskiego, można przyjąć następujące kryteria klasyfikacji:

- cechy przedmiotu pracy – podział na procesy zmieniające właściwości fizyczne lub chemiczne;
- charakter działań wykonywanych w stosunku do przedmiotu pracy procesy technologiczne, pomiarowo-kontrolne, transportowe, składowania;
- sposób, w jaki procesy wiążą się z wytworzeniem produktu podstawowego danego przedsiębiorstwa – procesy produkcji podstawowej, produkcji pomocniczej, obsługi, utylizacji²³.

2.1.2. Układ sterowania produkcją

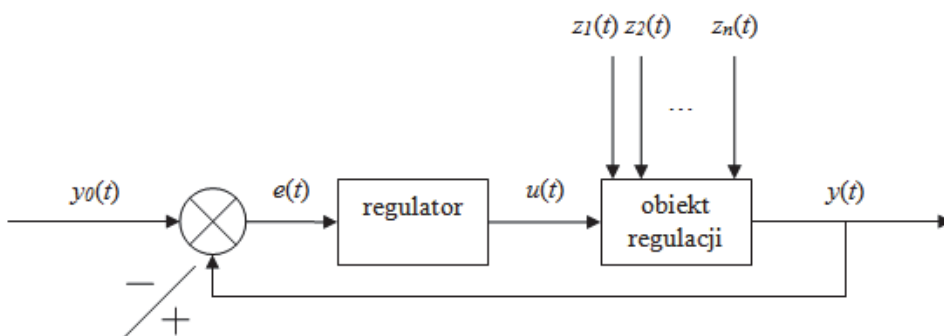
Działania zarządcze w systemie produkcyjnym, mają na celu zrealizowanie planów produkcyjnych przy poniesieniu jak najmniejszych kosztów. Jest to zatem sterowanie produkcją. W rozdziale 0 przedstawiono ideę i działanie sprzężenia zwrotnego na system. W technice układ ze sprzężeniem zwrotnym nazywa się układem zamkniętym. Stosuje się go do regulacji, czyli do osiągnięcia na wyjściu obiektu wartości zadanej. Układ sterowania może mieć postać otwartą (bez sprzężenia zwrotnego) lub zamkniętą, ale dopiero w zamkniętym układzie sterownik jest regulatorem. Na rysunku 2.3 przedstawiono schemat blokowy zamkniętego układu sterowania (regulacji). Poprzez porównanie sygnału wyjściowego $y(t)$ z wartością zadaną $y_0(t)$ w węźle sumacyjnym, otrzymywana jest wartość uchybu regulacji $e(t) = y_0(t) \pm y(t)$, który jest sygnałem wejściowym dla regulatora. Z regulatora wychodzi sygnał sterujący $u(t)$, który wchodzi na obiekt

²¹ E. Pająk, *Zarządzanie produkcją. Produkt, technologia, organizacja*, Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa 2006, ss. 85-87.

²² I. Durlik, *Inżynieria zarządzania. Strategia i projektowanie systemów produkcyjnych*, cz. 1, wyd. IV, Agencja Wydawniczo-Poligraficzna „Placet”, Warszawa 1998, ss. 53-56.

²³ B. Liwowski, R. Kozłowski, *Podstawowe zagadnienia zarządzania produkcją*, wyd. II poszerz., Oficyna a Wolters Kluwer business, Kraków 2007, ss. 17-22.

regulacji. Niekiedy, na obiekt regulacji działają również zakłócenia $z_1(t)$, $z_2(t)$, $z_3(t)$, ..., $z_n(t)$. Układ sterowania można uznać za dobrze działający, jeśli uchyb $e(t)$ jest możliwie mały, w idealnej sytuacji równy zero, nawet przy występujących zakłóceniach. Jeśli sterowanie odbywa się bez ingerencji człowieka, mówimy o regulacji automatycznej, natomiast w przypadku oddziaływania człowieka, jest to regulacja ręczna^{24,25}.



Rys. 2.3. Schemat blokowy zamkniętego układu sterowania

Źródło: opracowanie własne na podstawie: A. Dębowski, *Automatyka. Podstawy teorii*, Wydawnictwa Naukowo-Techniczne, Warszawa 2008, s. 12.

Jako obiekt w przypadku sterowania produkcją, można uznać wszelkie komórki produkcyjne przedsiębiorstwa, które wraz z służbami sterowania produkcją (pełniącymi rolę regulatora), zawierają się w systemie produkcyjnym. To, czego oczekujemy od układu sterowania produkcją, to wyprodukowanie przyjętej wielkości produkcji w określonym terminie. Występujące zakłócenia to m.in. wszelkie awarie, niedostarczone lub dostarczone z opóźnieniem materiały, brak lub niewystarczające informacje niezbędne do produkcji, brak odpowiedniej kadry lub absencja pracowników, braki produkcyjne²⁶. Wielkość produkcyjna, a także czas przeznaczony na wyprodukowanie konkretnych ilości, może się zmieniać zatem nie tylko poprzez napływ nowych zamówień, lecz również przez nadrabianie zaległych.

²⁴ A. Dębowski, *Automatyka. Podstawy teorii*, Wydawnictwa Naukowo-Techniczne, Warszawa 2008, ss. 9-19.

²⁵ T. Kaczorek, *Teoria układów regulacji automatycznej*, wyd. II, Wydawnictwa Naukowo-Techniczne, Warszawa 1977, s. 118.

²⁶ K. Szatkowski (red.), *Nowoczesne zarządzanie produkcją. Ujęcie procesowe*, PWN, Warszawa 2014, ss. 321-326.

3. ROZWIĄZYWANIE ZAGADNIEŃ DYNAMIKI SYSTEMÓW

3.1. Istota dynamiki systemów

Pierwsze zastosowania metody obecnie znanej jako dynamika systemów (ang. *system dynamics*) dotyczyły przemysłu (ang. *industrial dynamics*), kolejne – urbanistyki (ang. *urban dynamics*). *System dynamics* opiera się na uogólnieniach obu metod, które doprowadziły do ustalenia poniższych założeń:

- ciągłość – metoda dynamiki systemów opisuje procesy ciągłe, bądź interpretowane jako ciągłe;
- okresowość działań regulacyjnych – w systemach dynamicznych podejmowane są działania regulacyjne o charakterze okresowym, co oznacza występowanie kroku symulacji;
- orientacja na dynamikę – modelujący i eksperymentator stawiają sobie za podstawowy cel badanie własności dynamicznych systemu;
- przyczynowość (kauzalizm) – model zbudowany z zastosowaniem metody *system dynamics* oparty jest o występowanie zależności przyczynowo-skutkowych²⁷.

Przy stosowaniu metody dynamiki systemów należy pamiętać o istnieniu paradygmatów dotyczących relacji między strukturą a zachowaniem systemów:

- Antyintuicyjny charakter zachowań systemów – systemy dynamiczne są złożone, co utrudnia przewidywanie ich zachowania się.
- Brak meta-reguł modelowania systemu – podczas budowy systemu należy uwzględniać czynniki wynikające z posiadanej wiedzy, doświadczenie i intuicję ekspertów, teorie dyscyplin szczegółowych, dane obserwacyjne i empiryczne.
- Izomorfizm struktur i zachowań – systemy o podobnych strukturach mają, zaś systemy o różnych strukturach mogą mieć podobne zachowania.
- Nieliniowość zachowania systemu dynamicznego – skutek występowania sprzężeń zwrotnych, opóźnień i wzmocnień w systemie, jego zachowanie się ma zwykle charakter nieliniowy.

²⁷ A. Maciąg, R. Pietroń, S. Kukła, *Prognozowanie i symulacja w przedsiębiorstwie*, Polskie Wydawnictwo Ekonomiczne, Warszawa 2013, ss. 183-184.

- Ograniczona racjonalność – subiektywizm kryteriów oceny wariantów, redukcja czynników, opóźnienie podjętych decyzji regulacyjnych wpływa na istnienie tzw. ograniczonej racjonalności, przy której podejmowane są decyzje dotyczące regulacji w systemie.
- Zachowanie systemu określone przez jego strukturę – np. obecność dodatniego sprzężenia zwrotnego działa destabilizująco na system, w przeciwieństwie do ujemnego sprzężenia zwrotnego²⁸.

3.2. Rola myślenia systemowego w rozwiązywaniu systemów

Dynamika systemów jest metodą, w której rzeczywistość postrzegana jest jako system, a dokładniej jako zbiory różnych systemów wzajemnie na siebie wpływających. Aby zbudować model danego systemu, należy zacząć myśleć systemowo. Taki sposób myślenia został określony przez Petera M. Senge'a jako jedna z pięciu dyscyplin organizacji uczącej się. Cztery kolejne dyscypliny to mistrzostwo osobiste, modele (mapy) myślowe, wspólna wizja oraz zespołowe uczenie się²⁹. Aby myśleć systemowo, należy posiadać umiejętności:

- myślenia dynamicznego – postrzeganie i przewidywanie własności dynamicznych;
- myślenia naukowego – budowanie modeli, stawianie hipotez i poddawanie ich weryfikacji;
- myślenia o ciągłości – myślenie w kategoriach procesów, a nie zdarzeń;
- myślenia o sprzężeniach zwrotnych – postrzeganie ich wewnątrz systemu;
- myślenia operacyjnego – tworzenie programu działania operacyjnego;
- myślenia strukturalnego – postrzeganie struktur;
- myślenia uogólniającego – tworzenie uogólnień i archetypów systemów³⁰.

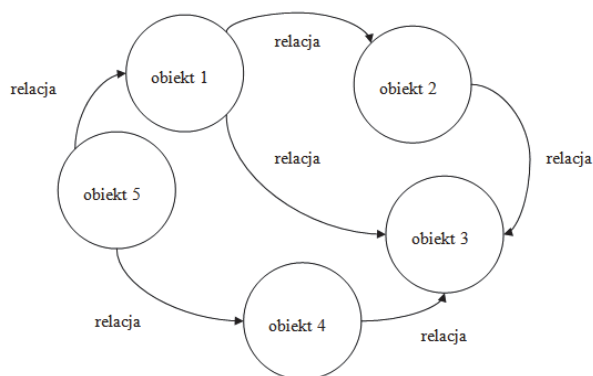
System to zespół elementów (obiektów), które można opisać pewnymi cechami (atrybutami), i ich wzajemne oddziaływania (relacje), tworzące strukturę systemu. Stan systemu to opis wszystkich obiektów wraz z ich atrybutami i działaniami w danej chwili. Monitorowanie zmian stanu systemu określa się jako badanie systemu³¹. Przykładowy system z pięcioma obiektami i relacjami między nimi został przedstawiony na rysunku 3.1.

²⁸ Tamże, ss. 184-185.

²⁹ P.M. Senge, *Piąta dyscyplina. Teoria i praktyka organizacji uczących się*, wyd. VI poszerz., Oficyna a Wolters Kluwer business, Warszawa 2012, ss. 22-28.

³⁰ A. Maciąg, R. Pietroń, S. Kukla, *Prognozowanie i symulacja w przedsiębiorstwie*, Polskie Wydawnictwo Ekonomiczne, Warszawa 2013, s. 185.

³¹ G. Gordon, *Symulacja systemów*, Wydawnictwo Naukowo-Techniczne, Warszawa 1974, s.18.



Rys. 3.1. Przykład struktury systemu

Źródło: opracowanie własne.

Systemy możemy określić jako naturalne lub stworzone przez człowieka. Ponadto funkcjonują inne klasyfikatory. Biorąc pod uwagę wpływ działań zachodzących na zewnątrz systemów, można określić system jako:

- otwarty – uwzględniający istnienie działań zewnętrznych;
- zamknięty – nieuwzględniający istnienia działań zewnętrznych.

Rozpatrując reakcję systemu na zmiany w jego otoczeniu, występuje podział na:

- adaptacyjne – posiadające możliwość reakcji na wystąpienie zmian;
- nieadaptacyjne – nieposiadające tej możliwości³².

Dzieląc systemy według dominującego występującego charakteru zmian w nich zachodzących, określa się je jako:

- ciągłe – modelowane za pomocą ciągłych równań, które opisują zmiany stanu w czasie;
- dyskretne – opis związany jest ze zdarzeniami, które wywołują zmiany stanu³³.

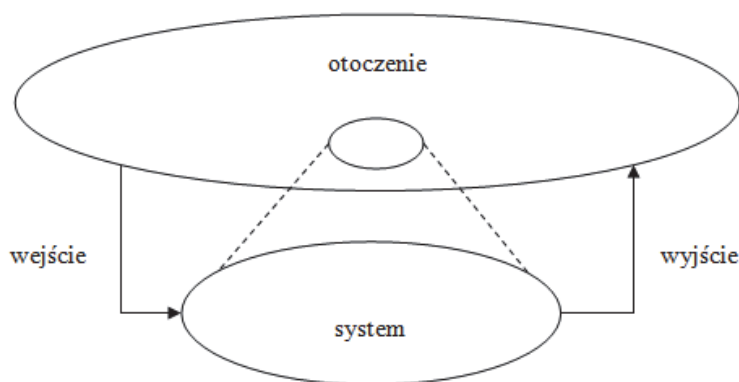
System spełnia określoną funkcję, zaś aby można go było opisać, czy też badać, systemy rozpatruje się jako wyodrębnione z otoczenia^{34,35}. Miejsce systemu w otoczeniu zostało przedstawione na rysunku 3.2.

³² G.S. Fishman, *Symulacja komputerowa. Pojęcia i metody*, Państwowe Wydawnictwo Ekonomiczne, Warszawa 1981, ss. 20-21.

³³ G. Gordon, *Symulacja systemów*, Wydawnictwo Naukowo-Techniczne, Warszawa 1974, ss. 20-21.

³⁴ <http://encyklopedia.pwn.pl/haslo/system;3982198.html>, dostęp z dnia 27.09.2015 r.

³⁵ K. Krupa, *Modelowanie, symulacja i prognozowanie. Systemy ciągłe*, Wydawnictwo Naukowo-Techniczne, Warszawa 2008, s. 13.



Rys. 3.2. Relacja system – otoczenie

Źródło: opracowanie własne.

3.3. Modele systemów i ich rodzaje

By zrozumieć działanie, a następnie próbować przewidywać lub odtworzyć zachowanie przedmiotu badań (względnie systemu), budowane są modele. Model może mieć postać obiektu teoretycznego lub fizycznego, a jego „(...) analiza lub obserwacja umożliwia poznawanie cech innego badanego obiektu, procesu lub zjawiska”³⁶. Ponadto, modele „(...) ułatwiają zrozumienie zjawisk przeszłych oraz umożliwiają przewidywanie zjawisk przyszłych”. Aby model spełniał swoją funkcję, powinien zmniejszać złożoność rozpatrywanych zjawisk do stopnia, który umożliwia poznanie lub projektowanie tych zjawisk³⁷. Przy tworzeniu modelu należy pamiętać, że zbytnia szczegółowość oraz redundancja czynników są niewskazane³⁸. Skutkuje to zbudowaniem modelu nieuniwersalnego, nieogólnego. W takim przypadku, wystąpienie w rzeczywistym systemie faktora nieuwzględnionego w modelu zbyt szczegółowym, może skutkować znaczną różnicą między wartościami prognozowanymi a rzeczywistymi.

Modele można podzielić na:

- fizyczne – struktura fizyczna i funkcjonalna modelu jest taka sama jak badanego obiektu lub zastępuje badane zjawisko innym. Model systemu może różnić się od niego skalą;

³⁶ A. Maciąg, R. Pietroń, S. Kukla, *Prognozowanie i symulacja w przedsiębiorstwie*, Polskie Wydawnictwo Ekonomiczne, Warszawa 2013, s. 348.

³⁷ <http://encyklopedia.pwn.pl/haslo/model;3942505.html>, dostęp z dnia 27.09.2015 r.

³⁸ K. Krupa, *Modelowanie, symulacja i prognozowanie. Systemy ciągłe*, Wydawnictwo Naukowo-Techniczne, Warszawa 2008, s. 12.

- schematyczne – model występuje w postaci diagramów, schematów, map, sporządzonych w odpowiedniej skali. Mogą występować jako modele dwu- i trójwymiarowe;
- symboliczne (matematyczne) – model oparty jest na zapisie matematycznym oraz algorytmicznym. Wśród modeli matematycznych można rozróżnić:
 - analityczne – rozwiązanie problemu jest możliwe do wydedukowania poprzez analizę postaci matematycznej;
 - numeryczne – rozwiązanie możliwe jedynie z zastosowaniem metod numerycznych.

Biorąc pod uwagę jako klasyfikator sposób reprezentacji czasu, modele dzieli się na:

- statyczne – czas nie wpływa na stan systemu, można opisywać chwilowy stan systemu w dowolnym momencie, lub pominąć jego udział;
- dynamiczne – stan systemu, a zatem i zmienne opisujące model, zależą od czasu i stanów przeszłych.

Ze względu na występowanie elementu losowości w modelu:

- deterministyczne – wszystkie obiekty są ze sobą ściśle powiązane, a rozwiązanie problemu jest całkowicie jednoznaczne;
- stochastyczne – powiązania między obiektami są przynajmniej częściowo losowe. Rozwiązania problemu nie sposób jednoznacznie określić, można jedynie uśrednić otrzymane wyniki^{39,40}.

Modele można sklasyfikować według reprezentowanych przez nie systemów, dlatego oprócz powyższych typów modeli, można wyróżnić również:

- ciągłe – zmiany zmiennych stanu przebiegają w sposób ciągły w czasie;
- dyskretne – zmiany zmiennych stanu przebiegają w sposób nieciągły, dyskretny, w określonych momentach zwanych zdarzeniami^{41,42}.

³⁹ G.S. Fishman, *Symulacja komputerowa. Pojęcia i metody*, Państwowe Wydawnictwo Ekonomiczne, Warszawa 1981, ss. 24-25.

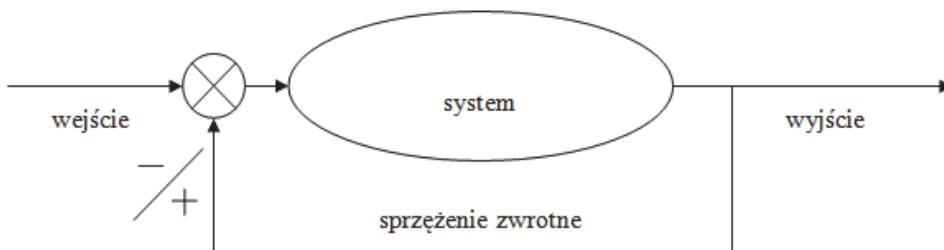
⁴⁰ A. Maciąg, P. Pietroń, S. Kulka, *Prognostowanie i symulacja w przedsiębiorstwie*, Polskie Wydawnictwo Ekonomiczne, Warszawa 2008, ss. 153-154.

⁴¹ B.P. Zeigler, *Teoria modelowania i symulacji*, Państwowe Wydawnictwo Naukowe, Warszawa 1984, s. 47.

⁴² G. Gordon, *Symulacja systemów*, Wydawnictwo Naukowo-Techniczne, Warszawa 1974, s. 24.

Sprężenie zwrotne

W wielu modelach występują sprzężenia zwrotne, pełniące ważną rolę w systemach, w których się one znajdują. Jest to reakcja systemu na jego własne działanie. Sprężenie zwrotne zostało schematycznie przedstawione na rysunku 3.3.



Rys. 3.3. System ze sprzężeniem zwrotnym

Źródło: opracowanie własne.

W zależności od działania sprzężenia zwrotnego na wartości wejściowe, można mówić o dwóch jego głównych typach.

- Sprężenie zwrotne ujemne (równoważące; stabilizujące) oznaczono symbolem „-” na rysunku 3.3. Występuje, gdy system dąży do jakiegoś celu, a wartość na wyjściu systemu ma pozostać na pewnym poziomie, dążyć do wartości zadanej.
- Sprężenie zwrotne dodatnie (wzmacniające) oznaczono symbolem „+” na rysunku 3.3. Występuje, gdy nawet z pozoru małe i nic nie znaczące zdarzenia czy parametry, decydują o znaczących konsekwencjach. Zwane jest również „samospełniającą się przepowiednią”, „efektem Pigmaliona”, „efektem kuli śnieżnej” oraz „błędny kołem”. Sprężenie to potęguje zmiany, co może wpłynąć zarówno korzystnie, jak i negatywnie na system^{43,44}.

Można również spotkać pojęcie kompensującego sprzężenia zwrotnego, do którego dochodzi, gdy „(...) podejmowane w dobrej wierze interwencje wywołują reakcję systemu, która niweluje wynikające z niego korzyści”⁴⁵.

⁴³ K. Krupa, *Modelowanie, symulacja i prognozowanie. Systemy ciągłe*, Wydawnictwo Naukowo-Techniczne, Warszawa 2008, ss. 15-17.

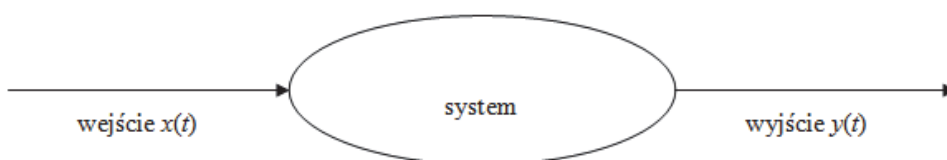
⁴⁴ P.M. Senge, *Pięta dyscyplina. Teoria i praktyka organizacji uczących się*, wyd. VI poszerz., Oficyna a Wolters Kluwer, Warszawa 2012, ss. 101-106.

⁴⁵ Tamże, s. 78.

Ważnym pojęciem jest również opóźnienie, czyli brak odpowiednio szybkiej odpowiedzi systemu na sprzężenie zwrotne. Przy układach o dużej inercji lub bardzo długim czasie przekazywania informacji, opóźnienie może być na tyle duże, że odpowiedź systemu na zmiany wynikłe z występowania sprzężenia zwrotnego nie wystąpi w czasie, który został przeznaczony na obserwację działania układu. Gdy czas oczekiwania na wynik zmian wykracza poza horyzont czasowy, niemożliwe jest uznanie wpływu tego sprzężenia zwrotnego za rozpatrzone⁴⁶.

3.4. Symulacja systemów

Zamodelowany system poddaje się symulacji, w celu walidacji i weryfikacji zbudowanego modelu. Gdy spełnia on oczekiwania swojego twórcy, można przystąpić do badania systemu. System dynamiczny można zamodelować jako funkcję transformacji T wektora wejść $x(t)$ w wektor wyjść $y(t)$ ($y(t)=T\{x(t)\}$), zgodnie z rysunkiem 3.4.



Rys. 3.4. System dynamiczny

Źródło: opracowanie własne na podstawie: A. Maciąg, R. Pietroń, S. Kukła, *Prognostowanie i symulacja w przedsiębiorstwie*, Polskie Wydawnictwo Ekonomiczne, Warszawa 2013, s. 187.

Wyróżnia się trzy cele modelowania symulacyjnego:

- identyfikacyjny – tworzenie praw funkcjonowania systemu (znane są $x(t)$ i $y(t)$);
- racjonalizacyjny/retrospektywny – optymalizowanie lub wyznaczenie wejść, które zapewnią osiągnięcie wyznaczonych efektów na wyjściu systemu (znane są: funkcja transformacji T i wyjście $y(t)$);
- predykcyjny – wyznaczenie charakterystyk działania systemu przy określonych warunkach (znane są wejście $x(t)$ i funkcja transformacji T)⁴⁷.

⁴⁶ K. Krupa, *Modelowanie, symulacja i prognozowanie. Systemy ciągłe*, Wydawnictwo Naukowo-Techniczne, Warszawa 2008, s. 15.

⁴⁷ A. Maciąg, R. Pietroń, S. Kukła, *Prognostowanie i symulacja w przedsiębiorstwie*, Polskie Wydawnictwo Ekonomiczne, Warszawa 2013, ss. 149-150.

Każdy z powyższych celów symulacji może nieść pozytywne skutki, pozwalające oszczędzić in. n. czas, środki finansowe czy materialne. W obecnych czasach, stosowana jest symulacja komputerowa z zastosowaniem modeli symulacyjnych⁴⁸. Umożliwia ona przeprowadzanie skomplikowanych obliczeń, oszczędzając czas, który pełni podstawową rolę w funkcjonowaniu systemów. Obserwacja faktycznych zachowań niektórych systemów rzeczywistych jest ponadto bardzo trudna lub wręcz niemożliwa. Stosując symulację komputerową można symulować zjawiska, które zachodzą bardzo wolno lub bardzo szybko, oraz systemy, które są dopiero projektowane. Dobierając odpowiedni krok czasowy, czyli jednostkę czasu, co ile sprawdzany jest stan wszystkich zmiennych systemu, można dokładniej przyrzeć się ich przebiegom w czasie. Symulacja komputerowa zapewnia również powtarzalność. Każde badanie działania systemu przy tych samych warunkach początkowych da taki sam efekt, co przy próbach w systemach rzeczywistych jest bardzo często niemożliwe. Ponadto kolejne powtarzanie niesie ze sobą zawsze pewne koszty, które przy symulacji komputerowej są sprowadzone do minimum w porównaniu z symulacją w warunkach rzeczywistych⁴⁹.

3.5. Programy symulacyjne wykorzystywane w dynamice systemów

Szeroki dostęp do komputerów spowodował rozwój rynku programów symulacyjnych. Programy te można podzielić na przeznaczone do symulacji procesów dyskretnych oraz ciągłych (które *de facto* są również dyskretyzowane przez to, iż jest to symulacja komputerowa)⁵⁰. Dostępne są programy zarówno wyłącznie komercyjne: MapleSim, Wolfram SystemModeler, Stelle, iThink, Matlab/Simulink, Powersim Studio, komercyjne dostępne w wersji PLE (ang. *Personal Learning Environment*): AnyLogic, Vensim oraz inne bezpłatne, na różnych licencjach otwartego oprogramowania: Simantics System Dynamics – EPL (ang. *Eclipse Public License*), SystemDynamics – GPL (ang. *General Public License*), Pyndamics – MIT License (ang. *Massachusetts Institute of Technology License*).

Vensim

Programem wykorzystywanym w niniejszym opracowaniu jest Vensim w wersji PLE (ang. *Personal Learning Environment*), czyli w wersji przeznaczonej jedynie do celów edukacyjnych, posiadającej ograniczenia dotyczące

⁴⁸ <http://encyklopedia.pwn.pl/haslo/symulacja-komputerowa;3982026.html>, dostęp z dnia 10.10.2015 r.


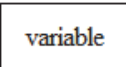


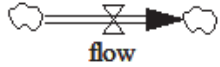
⁴⁹ K. Krupa, *Modelowanie, symulacja i prognozowanie. Systemy ciągłe*, Wydawnictwo Naukowo-Techniczne, Warszawa 2008, ss. 19-20.

⁵⁰ Tamże, ss. 20-21.

dostępnych funkcji i narzędzi programu. Jest to produkt firmy Ventana Systems Inc., dostępny na stronie producenta.

Przy tworzeniu schematów strukturalnych modeli symulacyjnych, wykorzystuje się podstawowe elementy, przedstawione w tabeli 3.1, łącząc je w mniej lub bardziej rozbudowane układy.

Tabela 3.1. Elementy strukturalnych modeli symulacyjnych

Oznaczenie graficzne	Definicja
	Zmienna pomocnicza, parametr (ang. <i>constants, auxiliary, data</i>) – wielkość zmienna lub stała w czasie, będąca pomocniczą lub określającą zależności, które mają wpływ na strumień lub inną wielkość pomocniczą
	Poziom, zasób (ang. <i>level, stock</i>) – wartość zmienna w czasie, określająca stan systemu w danej chwili
	Zmienna cieniowa (ang. <i>shadow variable</i>) – wartość z innego lub tego samego widoku lub dotycząca czasu w symulacji, do której się odwołujemy. Pozwala zachować większą przejrzystość w wyglądzie modelu
	Strzałka (ang. <i>arrow</i>) – relacja między dwoma elementami, gdzie możliwe są relacje między zasobami, strumieniami, zmiennymi pomocniczymi i stałymi
	Strumień ze stanowiskiem decyzyjnym (ang. <i>flow, rate</i>) – proces, decyzja lub działanie, które wpływa na zmianę zasobu w danym przedziale czasu

Źródło: opracowanie własne na podstawie: A. Maciąg, R. Pietroń, S. Kukla, *Prognostowanie i symulacja w przedsiębiorstwie*, Polskie Wydawnictwo Ekonomiczne, Warszawa 2013, s. 187 oraz K. Krupa, *Modelowanie, symulacja i prognozowanie. Systemy ciągłe*, Wydawnictwo Naukowo-Techniczne, Warszawa 2008, ss. 125-126.

Zasoby z reguły związane są ze strumieniami. Strumienie, wyrażając przepływ materiału lub informacji, mogą mieć źródło lub ujście w zasobach. Stąd, zasób traktuje się jako całkę różnicy strumieni. Oznaczmy stan zasobu $x(t)$ w chwili t , który jest jednocześnie na wyjściu strumienia $v(t)$ i wejściu strumienia $w(t)$, oraz przyjmijmy że czas s jest bliski zeru i mieści się w przedziale między czasem początkowym t_0 i czasem t . Możemy wtedy wyliczyć $x(t)$ zgodnie z równaniem (1):

$$x(t) = \int_{t_0}^t (v(s) - w(s))ds + x(t_0) \quad (1)$$

gdzie:

$x(t)$ – zasób w chwili t ,

$v(s)$ – strumień wejściowy w chwili s ,

$w(s)$ – strumień wyjściowy w chwili s ,

$x(t_0)$ – zasób w chwili t_0 .

W układach, w których brak strumienia wyjściowego, zasób kumuluje medium w tempie, w jakim napływa ono strumieniem wejściowym^{51,52}.

⁵¹ A. Maciąg, R. Pietroń, S. Kukła, *Prognostowanie i symulacja w przedsiębiorstwie*, Polskie Wydawnictwo Ekonomiczne, Warszawa 2013, ss. 186-187.

⁵² J.D. Sterman, *Business Dynamics: Systems Thinking and Modeling for a Complex World*, Irwin/McGraw-Hill, Boston 2000, ss. 193-195.

4. MODEL SYMULACYJNY PRZEDSIĘBIORSTWA W UJĘCIU DYNAMICZNYM

Stworzenie modelu zaopatrzenie – produkcja – zbyty poprzedziły analizy kilku innych, prostszych modeli i przeprowadzenie za ich pomocą symulacji. Postać tych modeli oparta była na literaturze. Wprowadzane były jednak zmiany mające ustalić, czy zmieniona postać modelu i wzięcie pod uwagę innych zmiennych, nie dałyby bardziej zadowalających rezultatów. Ponieważ nie były to modele konkretnego przedsiębiorstwa i nie opierano się na żadnych rzeczywistych danych, nie można było dokonać sprawdzenia ilościowego modeli. Dokonano selekcji na podstawie przeglądu otrzymanych charakterystyk i ich jakości. Odrzucono te modele, w których przeprowadzone symulacje posiadały przebiegi zmiennych odbiegające od oczekiwanych, typowych dla rzeczywistych, występujących w przedsiębiorstwach. Podczas wyboru kierowano się wiedzą dotyczącą zaopatrzenia, produkcji i zbytu oraz działania dynamiki systemów. Modele posiadające błędy grube można odrzucić właśnie podczas analizy ich jakości. Jeśli efekt działania nie jest poprawny, biorąc pod uwagę znajomość charakteru zmian, które powinny być efektem konkretnych zdarzeń, można od razu wyeliminować błędne modele. Aby dokonać analizy ilościowej, należy wprowadzić do modelu konkretne dane i porównać wyniki uzyskane przez model z otrzymanymi z przedsiębiorstwa, z którego dane zastosowano. Można wtedy stwierdzić, czy wielkości wygenerowane przez model są odpowiednie, czy wartości nie są zbyt przesunięte w czasie, zawyżone, zaniżone itd.

4.1. Podstawa modelu produkcja – zbyty

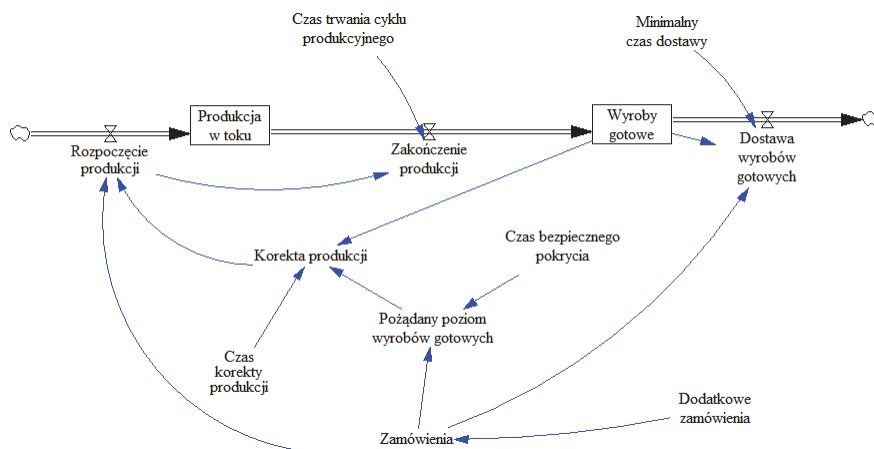
Najprostszy model przedsiębiorstwa produkcyjnego, którego celem jest utrzymanie ilości wyrobów gotowych na pożądanym poziomie wynikającym z zamówień, można przytoczyć za Felicjanem Rydzakiem i Edwardem Chlebusem⁶¹. Schemat został przedstawiony na rysunku 4.1, a definicje i jednostki zmiennych oraz stałych w tabeli 4.1. W modelu tym nie zostały uwzględnione żadne zakłócenia mogące przeszkodzić w produkcji. Zakładamy, że wszystkie wytworzone produkty spełniają wszelkie wymogi jakościowe, produkcja jest już przygotowana, nie uwzględniamy również czasu potrzebnego na jej rozruch. Tempo z jakim odbywa się produkcja (*Zakończenie produkcji*), zależy od jej

⁶¹ F. Rydzak, E. Chlebus, *Dynamic Model Based Resilience Analysis in Production Systems*, Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, Wrocław 2008, ss. 26-29.

aktualnie wymaganej wielkości na dany okres (*Rozpoczęcie produkcji*) oraz czasu potrzebnego na wyprodukowanie wyrobów, liczonego od momentu pobrania materiału do umieszczenia produktu w magazynie (*Czas trwania cyklu produkcyjnego*). W modelu uwzględniono korektę dotyczącą liczby produktów, które zostały dotąd wyprodukowane wraz z czasem potrzebnym na ich produkcję. Liczba wyrobów, które należy zacząć wykonywać (informacja o tylu sztukach do wykonania na tydzień jest wysyłana do strumienia *Rozpoczęcie produkcji*) jest określana przez wielkość *Korekta produkcji* oraz aktualne *Zamówienia*. *Korekta produkcji* jest różnicą między pożądanym poziomem gotowych wyrobów a ich obecną ilością, podzieloną przez wymagany czas na dostosowanie ilości gotowego produktu do pożądanej ilości. *Pożyczany poziom wyrobów gotowych* uwzględnia o tyle zwielokrotnioną ilość wyrobu w aktualnie napływającym zamówieniu, o ile dni przyjmujemy zapas bezpieczeństwa gotowego wyrobu (*Czas bezpiecznego pokrycia*). Rozpatrzono również *Dostawę wyrobów gotowych* do klienta, uwzględniającą to, by dostawa taka nie wynosiła więcej sztuk produktu, niż faktycznie wynosiło zamówienie. Minimalny czas przygotowania wyrobu do wysyłki i samej dostawy został ujęty w modelu jako *Minimalny czas dostawy*. Tempo dostaw jest wyliczane jako minimum pomiędzy aktualnym zamówieniem a ilorazem obecnego zasobu *Wyrobów gotowych* i *Minimalnym czasem dostawy*. Tempo to może być mniejsze niż wynika z zamówień, jeśli czas dostawy jest zbyt długi lub ilość wyrobów jest zbyt mała. Warto zauważyć, że jest to model dostaw wyrobu, który nie wymaga wysyłki w ściśle określonych partiach. Poziomy gotowego produktu i będącego w toku produkcji są całkami różnic odpowiednich strumieni. W przypadku *Produkcji w toku* są to strumienie wymaganego *Rozpoczęcia produkcji* i *Zakończenia produkcji*, gdzie wartość początkowa zasobu jest równa iloczynowi wielkości początkowego zamówienia i *Czasu trwania cyklu produkcyjnego*. Przy *Wyrobach gotowych* strumieniem wchodzącym jest *Zakończenie produkcji*, wychodzącym *Dostawa wyrobów gotowych*, zaś wartość początkowa jest równa *Pożyczanemu poziomowi wyrobów gotowych* w chwili rozpoczęcia symulacji.

Autorzy przywołanego modelu przyjęli dzień jako jednostkę czasu, zaś w tej pracy wszelkie modele (również ten) są z przyjęciem tygodnia roboczego (liczącego 5 dni) jako podstawowej jednostki czasu. W związku z tym, jeśli stosowana będzie stała wynosząca 1 dzień, w modelu zdefiniowana będzie ona jako 0,2 [tydz.]. Przy stosowaniu stałych o większej liczbie dni, wartość należy oczywiście odpowiednio zwielokrotnić. Jeśli model miałby być stosowany w przedsiębiorstwie o sześciodniowym trybie pracy, 1 dzień należy zdefiniować jako 0,17 [tydz.]. Odpowiednio, przy siedmiodniowym trybie pracy, 1 dzień wyniesie 0,14 [tydz.]. Modelowane hipotetyczne przedsiębiorstwo pracuje na 1 zmianę. Przy dostosowywaniu modelu do przedsiębiorstwa o większej liczbie

zmian, należy odpowiednio zwielokrotnić lub podzielić pewne wartości, jak np. czas trwania cyklu produkcyjnego. Zakładamy przy tym, że produkowany jest 1 typ produktu. Przyjęto krok symulacji wynoszący 0,0625.



Rys. 4.1. Podstawowy model symulacyjny produkcja – zbyt

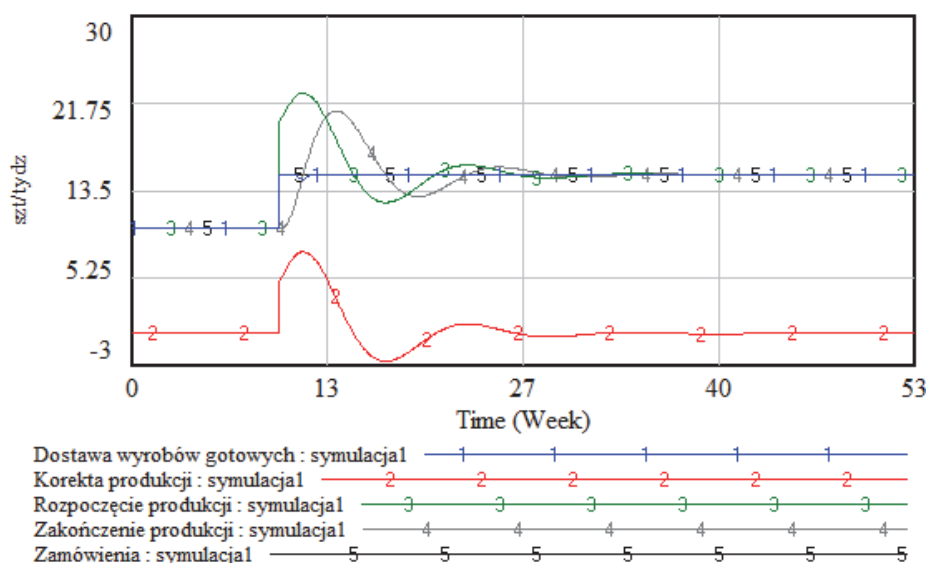
Źródło: opracowanie własne na podstawie: F. Rydzak, E. Chlebus, *Dynamic Model Based Resilience Analysis in Production Systems*, Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, Wrocław 2008, s. 27.

Tabela 4.1. Zmienne i stałe w podstawowym modelu produkcja – zbyt

Nazwa zmiennej/stalej	Definicja	Jednostka
Rozpoczęcie produkcji	Zamówienia + Korekta produkcji	[szt./tydz.]
Produkcja w toku	INTEG (Rozpoczęcie produkcji – Zakończenie produkcji) Wartość początkowa: Zamówienia * Czas trwania cyklu produkcyjnego	[szt.]
Zakończenie produkcji	DELAY3 (Rozpoczęcie produkcji, Czas trwania cyklu produkcyjnego)	[szt./tydz.]
Wyroby gotowe	INTEG (Zakończenie produkcji – Dostawa wyrobów gotowych) Wartość początkowa: Požadany poziom wyrobów gotowych	[szt.]
Dostawa wyrobów gotowych	MIN (Wyroby gotowe / Minimalny czas dostawy, Zamówienia)	[szt./tydz.]
Czas trwania cyklu produkcyjnego	Stała zależna od przedsiębiorstwa Zastosowano: 2	[tydz.]
Minimalny czas dostawy	Stała zależna od przedsiębiorstwa Zastosowano: 1	[tydz.]
Korekta produkcji	(Požadany poziom wyrobów gotowych – Wyroby gotowe) / Czas korekty produkcji	[szt./tydz.]
Czas korekty produkcji	Stała zależna od przedsiębiorstwa Zastosowano: 2	[tydz.]
Požadany poziom wyrobów gotowych	Zamówienia * Czas bezpiecznego pokrycia	[szt.]

Wykres na rysunku 4.2 przedstawia zmiany *Pożądanego poziomu wyrobów gotowych*, *Produkcji w toku* oraz *Wyrobów gotowych*. Od początku symulacji wartości te były równe dla wszystkich trzech wielkości, do czasu 10. tygodnia. Wtedy to następuje skok *Zamówień* o *Dodatkowe zamówienia*, przez co rośnie również *Pożądanany poziom wyrobów gotowych*.

Na rysunku 4.3 widoczne są przebiegi następujących zmiennych: *Dostawa wyrobów gotowych*, *Korekta produkcji*, *Rozpoczęcie produkcji*, *Zakończenie produkcji*, *Zamówienia*. Również i te zmienne (oprócz *Korekty produkcji*, która w tej sytuacji wynosi oczywiście zero) są na równym poziomie, produkcja jest ustabilizowana. Ponieważ *Zakończenie produkcji* w momencie występowaniu zmian w *Rozpoczęciu produkcji* (tutaj skokowych, wynikających z skokowego wzrostu *Zamówień*) wprowadza oscylacje poprzez opóźnienie trzeciego rzędu, wahania te przenoszą się również m.in. na ilości *Wyrobów gotowych*, *Produkcji w toku*. Przez skok ilości zamawianych produktów zmienia się również *Korekta produkcji*, osiągając nawet wielkości ujemne. Może się to przekładać na przyjmowanie również ujemnych wartości liczby produktów, która mają zostać wyprodukowane, choć nie jest to widoczne w tym przypadku.



Rys. 4.3. Przebiegi podstawowego modelu produkcja – zbyt

Źródło: opracowanie własne.

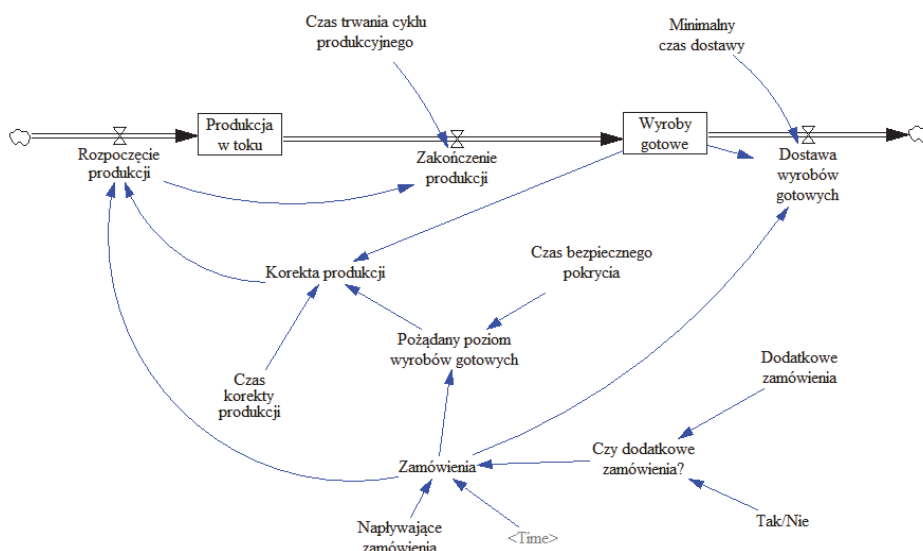
Model ten można z powodzeniem stosować jako najbardziej ogólną symulację przedsiębiorstwa produkcyjnego, gdy nie występują żadne zakłócenia

wpływające na przebieg produkcji i dostaw. Tak jak u Stermana⁶², przewidywane jest opóźnienie wykładnicze trzeciego stopnia w definicji *Zakończenia produkcji*. W odróżnieniu od jego modelu, *Rozpoczęcie produkcji*, a za nim kolejne zależne od niego wartości (np. *Korekta produkcji*, *Wyroby gotowe*), mogą przyjmować wartości ujemne. Widać to na rysunku 4.3. Jest to o tyle niekorzystne dla działania modelu, co nierealne w rzeczywistości. Należy więc nałożyć odpowiednie ograniczenie wartości. Inną różnicą jest brak wpływania na *Rozpoczęcie produkcji* przez korygowanie *Produkcji* w toku. W dalszej części pracy zostanie rozpatrzony wpływ takiej korekty. Zdecydowanym mankamentem modelu zaprezentowanego przez Rydzaka i Chlebusa jest brak uwzględnienia niezrealizowanych zamówień. Jeśli w danym tygodniu zdolność wysyłki gotowych wyrobów była mniejsza niż przewidywało zamówienie, w późniejszych tygodniach nie było to nadrabiane, a więc nie wszystkie zamówienia były realizowane. Również ten aspekt zostanie rozpatrzony w tej pracy.

4.1.1. Modyfikacja *Zamówień* oraz ograniczenie *Rozpoczęcia produkcji*

Zamówienia mogą nie być ustalone przez dłuższy okres, a napływać np. jako tygodniowe zamówienia na różne liczby sztuk. Może się zdarzyć, że różnice między tymi ilościami będą względnie duże. Aby zbliżyć model do warunków rzeczywistych, należy również dodać wspomniane ograniczenie *Rozpoczęcia produkcji*. W takim przypadku należy zmodyfikować model. Na rysunku 4.4 przedstawiono jego proponowaną postać, zaś w tabeli 4.2 sposób, w jaki nowe i zmienione wielkości zostały zdefiniowane. *Zamówienia* są sumą zamówień napływających w danym tygodniu oraz *Dodatkowych zamówień*, które zostały na stałym poziomie pięciu sztuk. W zależności od tego, czy chcemy rozpatrywać *Dodatkowe zamówienia*, możemy zmienić wartość parametru *Tak/Nie* na odpowiednio 1 lub 0. *Napływające zamówienia* przewidziano na cały badany przedział czasu, jeden rok, a ich zmiany wahają się od 10 do 150 sztuk na tydzień. W tym przypadku *Zamówienia* zmieniają się często o duże ilości, przyjęte w pracy w sposób mający oddać reakcje na gwałtowne zmiany. Przy przeprowadzaniu wszystkich badań w tej pracy, uwzględniono doliczanie *Dodatkowych zamówień*.

⁶² J.D. Sterman, *Business Dynamics: Systems Thinking and Modeling for a Complex World*, Irwin/McGraw-Hill, Boston 2000, ss. 713-716.

Rys. 4.4. Podstawowy model symulacyjny produkcji – zbył ze zmianą *Zamówień*

Źródło: opracowanie własne.

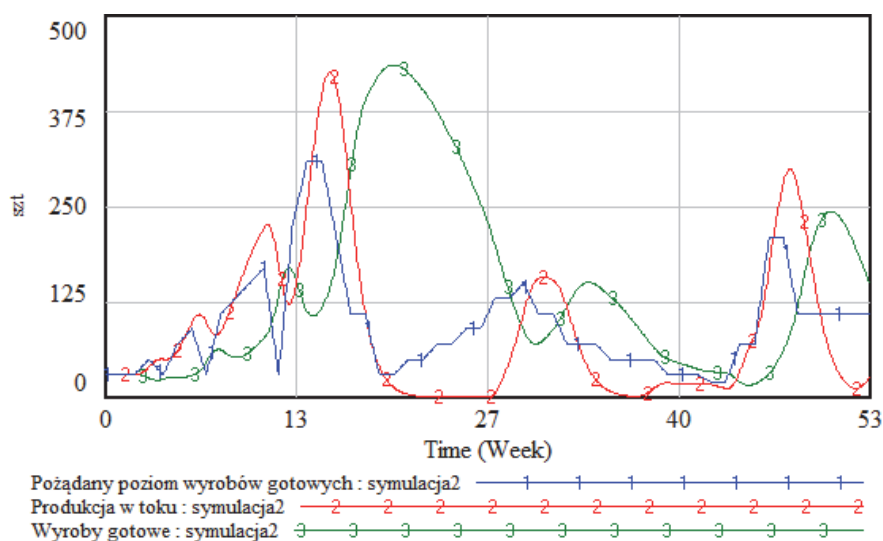
Tabela 4.2. Zmienne i stałe w podstawowym modelu produkcji – zbył ze zmianą *Zamówień*

Nazwa zmiennej/stałej	Definicja	Jednostka
Rozpoczęcie produkcji	MAX (Zamówienia + Korekta produkcji, 0)	[szt./tydz.]
Zamówienia	Napływające zamówienia (Time) + „Czy dodatkowe zamówienia?”	[szt./tydz.]
Dodatkowe zamówienia	Zależnie od przedsiębiorstwa Zastosowano: 5	[szt./tydz.]
Czy dodatkowe zamówienia?	IF THEN ELSE („Tak/Nie” = 1, Dodatkowe zamówienia, „Tak/Nie”)	[szt./tydz.]
Tak/Nie	1 (gdy tak) lub 0 (gdy nie) Zastosowano: 1	–
Napływające zamówienia	[(0,0) – (53,150)], (0,10), (1,10), (2,10), (3,20), (4,10), (5,30), (6,40), (7,10), (8,50), (9,60), (10,70), (11,80), (12,10), (13,110), (14,150), (15,150), (16,100), (17,50), (18,50), (19,10), (20,10), (21,20), (22,20), (23,30), (24,30), (25,40), (26,40), (27,60), (28,60), (29,70), (30,50), (31,50), (32,30), (33,30), (34,30), (35,20), (36,20), (37,20), (38,20), (39,10), (40,10), (41,10), (42,5), (43,5), (44,30), (45,30), (46,100), (47,100), (48,50), (49,50), (50,50), (51,50), (52,50), (53,50)	[nr tyg., liczba szt/tydz.]

Źródło: opracowanie własne.

Spodziewamy się, że w przebiegach *Pożądanego poziomu wyrobów gotowych* pojawią się wahania wartości podążające za zmianami *Zamówień* i ilości *Wyrobów gotowych*. Gdy ilość wyrobu w magazynie zmaleje wskutek wzrostu *Zamówień*, powinna zostać zwiększona *Produkcja w toku*. Gdy popyt zmaleje, tempo rozpoczęcia produkcji powinno zostać zwolnione lub nawet produkcja powinna zostać wstrzymana, aż do ponownego jej wznowienia, gdy wzrośnie popyt a zapasy produktu zaczną być niewystarczające. *Korekta produkcji* musi zmieniać się odpowiednio według zmian *Pożądanego poziomu wyrobów gotowych* i *Wyrobów gotowych*, ponieważ stanowi ich różnicę (podzieloną przez czas potrzebny na tę korektę). Z powodu nałożonego ograniczenia na *Rozpoczęcie produkcji*, nie może ono przyjmować wartości mniejszych od zera. *Zakończenie produkcji* powinno mieć przebieg zbliżony do *Rozpoczęcia produkcji*, jednak mieć łagodniejszy charakter i być opóźnionym, ponieważ wpływa na nie również czas cyklu produkcyjnego. Dostawy powinny odpowiadać wartościom *Zamówień*, chyba, że uniemożliwia to ilość gotowego wyrobu. W takim przypadku wartość *Dostawy wyrobów gotowych* będzie mniejsza niż popyt.

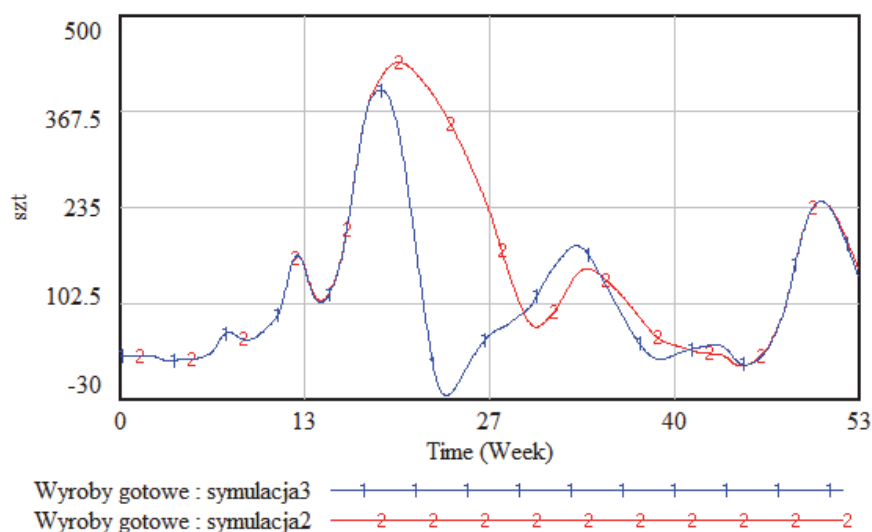
Przebiegi uzyskane z symulacji tego modelu przedstawiono na rysunkach 4.5 i 4.6. Przez większą część czasu, dostawy spełniają wymagane ilości, możemy jednak wskazać cztery przedziały czasu, gdy ilość wyrobów gotowych nie wypełnia zapotrzebowania: między tygodniami 4.-7., 8.-11., 13.-16. oraz 43.-48. Wynika to z charakteru zmian *Zamówień*. Przed czwartym tygodniem ilość zamawianych wyrobów była stosunkowo niska, dostawy były realizowane w pełni.



Rys. 4.5. Przebiegi podstawowego modelu symulacyjnego produkcji
– zbyt ze zmianą *Zamówień*
Źródło: opracowanie własne.

zareagować na czas wznawiając produkcję, gdy zapasy się kończą. Zaczyna się kolejny spadek *Zamówień*, uzupełnione zapasy ponownie stopniowo się wyczerpują, do momentu gdy po czterdziestym trzecim tygodniu nie są już w stanie pokryć zapotrzebowania. Produkcja ponownie gwałtownie wzrasta, jednak dopiero podczas spadku popytu, dostawy zawierają wszystkie zamówienia.

Na rysunku 4.7 przedstawiono różnicę w ilości *Wyrobow gotowych* między przypadkami, gdy zastosowano ograniczenie *Rozpoczęcia produkcji* (symulacja 2) i gdy tego ograniczenia nie nałożono (symulacja 3).



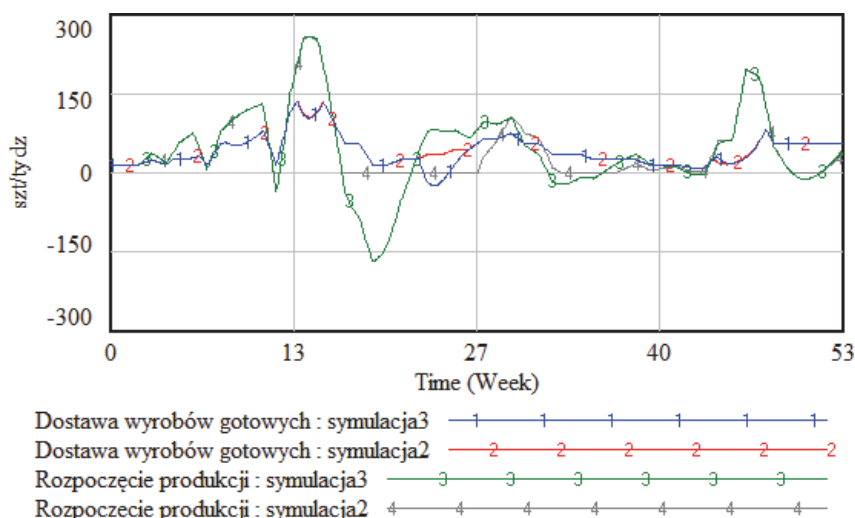
Rys. 4.7. Porównanie przebiegów z i bez ograniczenia na *Rozpoczęciu produkcji*

Źródło: opracowanie własne.

Wyraźnie widać, że wartości te bez wspomnianego ograniczenia mogą przyjmować wartości ujemne. Oznaczałoby to, że gotowe, w pełni wartościowe produkty musiałyby być niszczone lub wyrzucane. Jest to oczywiście nie do przyjęcia w rzeczywistości. Ponadto, zmniejszone zapasy oznaczają, że w razie nagłego skoku popytu, przedsiębiorstwo musi włożyć większy nakład pracy, by zrealizować dostawy. Oczywiście obydwa rozwiązania niosą ze sobą również koszty, gdzie niszczenie wyrobów, na który poniesiono koszty finansowe, czas produkcji, są jawnym marnotrawstwem.

Jedynie przy powolnym wzroście popytu, widać różnicę na korzyść rozwiązania z brakiem ograniczenia. Produkcja rozpoczyna się wtedy wcześniej, co widać na rysunku 4.8, gdzie zaprezentowano przebiegi *Dostawy wyrobów gotowych* oraz *Rozpoczęcia produkcji*. Przy zastosowaniu ograniczenia, dostawy były w większym stopniu realizowane, co szczególnie widać między dwudziestym drugim a dwudziestym szóstym tygodniem. Między czterdziestym trzecim

i czterdziestym piątym tygodniem, przy ostatnim gwałtownym skoku popytu, zmienia się to na korzyść rozwiązania bez ograniczenia, jednak chwilę potem lepsze wyniki osiąga model z ograniczeniem, jak również przy innych krótszych chwilach symulacji (np. około trzydziestego ósmego tygodnia).



Rys. 4.8. Porównanie przebiegów z i bez ograniczenia na *Rozpoczęciu produkcji*

Źródło: opracowanie własne.

Obserwując charakter zmian przebiegów symulacji stwierdzono poprawność modelu. Są one zgodne z przewidywaniami reakcji systemu produkcyjnego.

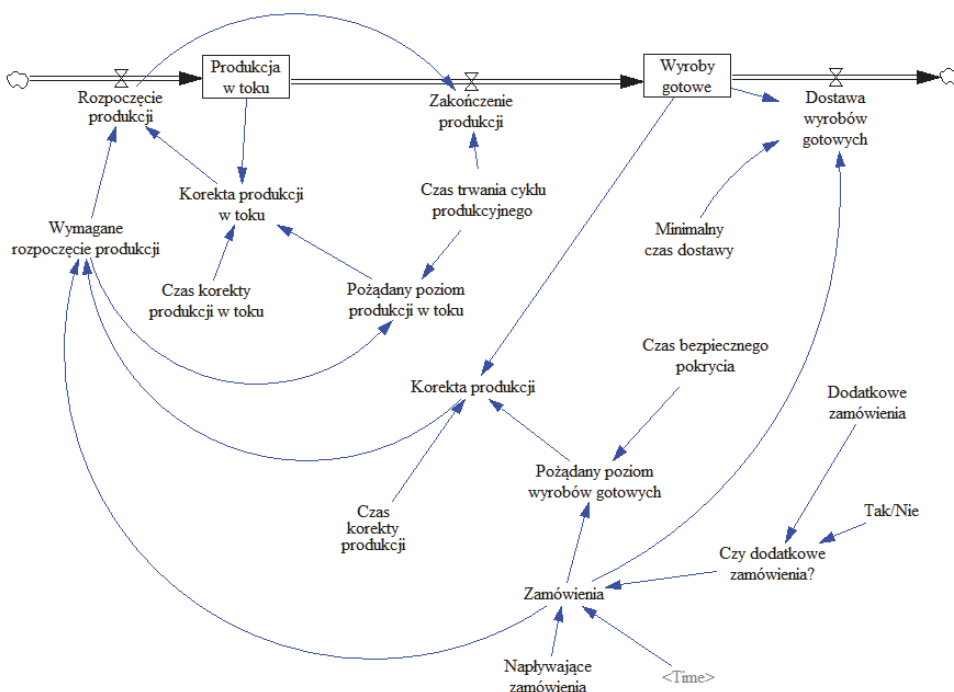
4.1.2. Modyfikacja z zastosowaniem *Korekty produkcji w toku*

W powyższych modelach zastosowano pętlę zwrotną od *Wyrobów gotowych* z *Korektą produkcji*, regulującą różnicę między ilością już wyprodukowanych wyrobów, a pożądanym poziomem uwzględniającym ich zapas. Zapas ten wynika ze zwielokrotnienia obecnego zamówienia o wskazany okres – w tej pracy są to dwa tygodnie. Można również zastosować dodatkową korektę, która będzie sprzężeniem zwrotnym od *Produkcji w toku*. Schemat już zmodyfikowanego modelu, został przedstawiony na rysunku 4.9, zaś w tabeli 4.3 zawarto definicje nowych i zaktualizowanych zmiennych. Modyfikacja została przeprowadzona według ogólnego modelu przedstawionego przez Stermana⁶³. Według niego zmieniono również wartość początkową *Produkcji w toku* na wielkość *Pożądanego poziomu produkcji w toku* z początku symulacji. Poprzednio nałożone

⁶³ J.D. Sterman, *Business Dynamics: Systems Thinking and Modeling for a Complex World*, Irwin/McGraw-Hill, Boston 2000, ss. 713-716.

ograniczenie na wartości *Rozpoczęcia produkcji* zostało utrzymane. W taki sam sposób ograniczono również *Wymagane rozpoczęcie produkcji*, pełniące funkcję parametru pomocniczego przy wyliczaniu tempa *Rozpoczęcia produkcji*.

Oczekujemy, że wprowadzenie tej korekty wpłynie na zwiększenie ilości *Wyrobow gotowych*. Wiąże się z tym mniejsza różnica między *Dostawą wyrobów gotowych* a *Zamówieniami* w okresach, gdy ilość gotowych produktów nie wystarczała na realizację wszystkich *Zamówień*. Prawidłowa reakcja na dodanie tej korekty jest kryterium poprawności tego modelu.



Rys. 4.9. Model symulacyjny produkcja – zbyt z dodaną *Korektą produkcji w toku*

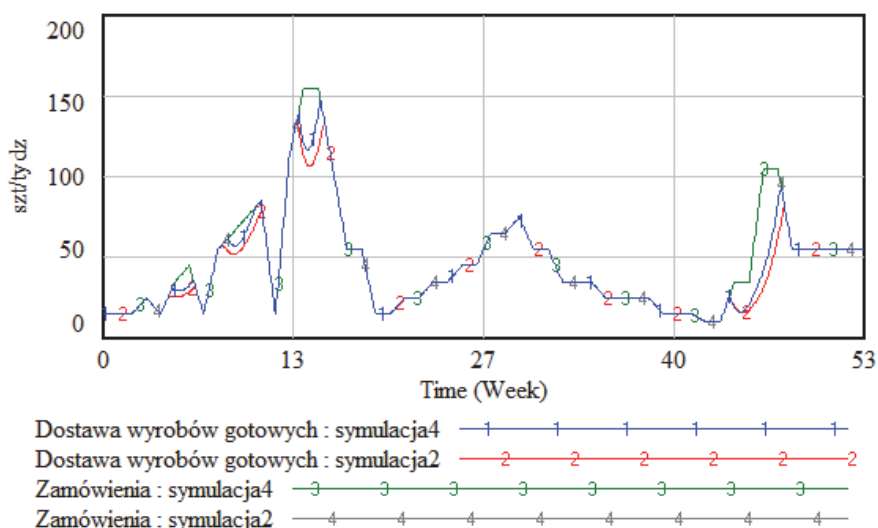
Źródło: opracowanie własne.

Tabela 4.3. Zmienne i stałe w modelu produkcja – zbyt z dodaną *Korektą produkcji w toku*

Nazwa zmiennej/stalej	Definicja	Jednostka
Rozpoczęcie produkcji	MAX (Wymagane rozpoczęcie produkcji + Korekta produkcji w toku, 0)	[szt./tydz.]
Produkcja w toku	INTEG (Rozpoczęcie produkcji – Zakończenie produkcji) Wartość początkowa: Požadany poziom produkcji w toku	[szt.]
Korekta produkcji w toku	(Požadany poziom produkcji w toku – Produkcja w toku) / Czas korekty	[szt./tydz.]

Nazwa zmiennej/stalej	Definicja	Jednostka
	produkcji w toku	
Czas korekty produkcji w toku	Stała zależna od przedsiębiorstwa Zastosowano: 2	[tydz.]
Pożądany poziom produkcji w toku	Wymagane rozpoczęcie produkcji * Czas trwania cyklu produkcyjnego	[szt.]
Wymagane rozpoczęcie produkcji	MAX (Korekta produkcji + Zamówienia, 0)	[szt./tydz.]

Źródło: opracowanie własne.



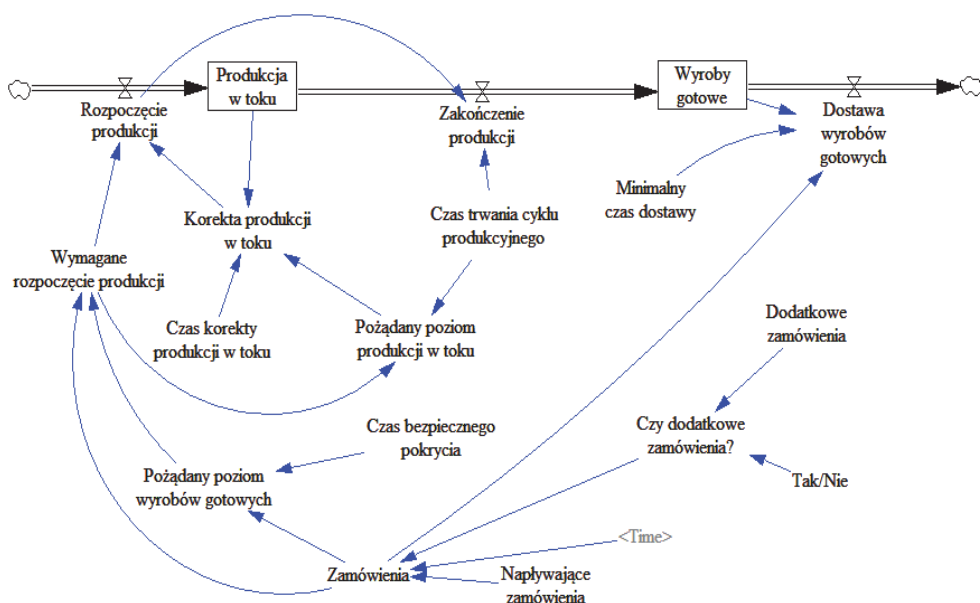
Rys. 4.10. Porównanie przebiegów z i bez Korekty produkcji w toku

Źródło: opracowanie własne.

Na rysunku 4.10 zaprezentowano przebiegi realizacji *Dostaw wyrobów gotowych* i złożonych *Zamówień* jako efekty symulacji tego modelu (symulacja 4) w porównaniu z przebiegami, gdy zastosowano wyłącznie *Korektę produkcji* (symulacja 2). Widać na nich, że uwzględnienie dodatkowej korekty nieznacznie polepszyło stopień realizacji zamówień, nie były one jednak w dalszym ciągu całkowicie wypełniane.

Model zachował się w oczekiwany sposób, zatem stwierdzono jego poprawne działanie. Nie wymagamy całkowitego wyeliminowania różnic między wartościami *Zamówień* i *Dostawy wyrobów gotowych*, ponieważ na odpowiednią do tego ilość wyrobów ma wpływ również czas. Nie badamy poprawności uzyskanych poszczególnych wartości, a charakter ich zmian.

Inną modyfikacją może być kontrolowanie wyłącznie wielkości *Produkcji w toku*, rezygnując z pętli zwrotnej od *Wyrobów gotowych*. Model taki przedstawiono na rysunku 4.11. Potrzebną zmianę definicji zmiennej *Wymagane rozpoczęcie produkcji* zawarto w tabeli 4.4.

Rys. 4.11. Model symulacyjny produkcja – zbytu bez *Korekty produkcji*

Źródło: opracowanie własne.

Tabela 4.4. Zmienna w modelu produkcja – zbytu bez *Korekty produkcji*

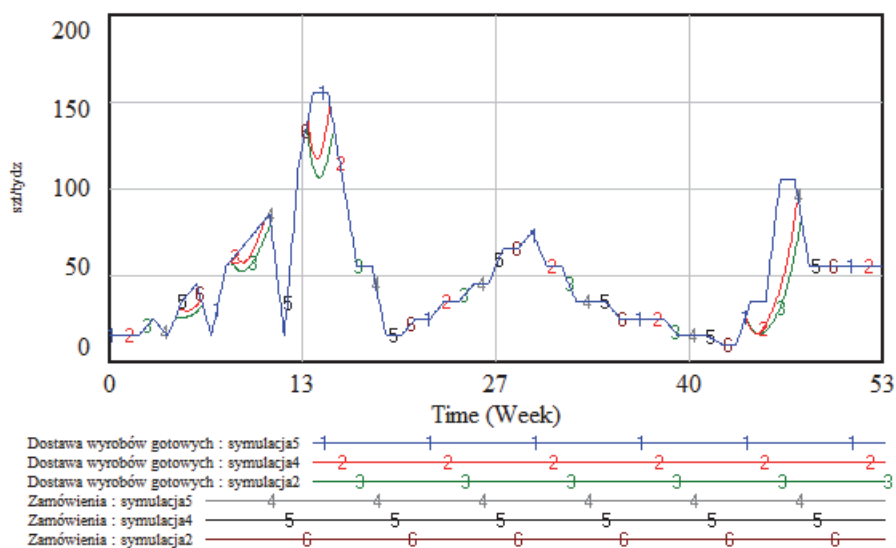
Nazwa zmiennej/stalej	Definicja	Jednostka
Wymagane rozpoczęcie produkcji	MAX (Pożądany poziom wyrobów gotowych + Zamówienia, 0)	[szt./tydz.]

Źródło: opracowanie własne.

W tym przypadku również spodziewamy się, zmniejszenia różnicy między *Dostawą wyrobów gotowych* i *Zamówieniami*. W tym przypadku model będzie uznany za poprawny niekoniecznie dlatego, że rozbieżność ich wartości zostanie zmniejszona w stosunku do modelu z korektą wyłącznie od wyrobów gotowych. Może się tak zdarzyć, ponieważ *Korekta produkcji* wymaga pośrednio czasu potrzebnego na przebieg cyklu produkcyjnego, natomiast reakcja *Korekty produkcji w toku* jest szybsza. Tym razem różnica między *Zamówieniami* a dostawami może się pojawić, jednak ważne będzie zachowanie zasobu *Wyroby gotowe*. Poprzednie modele uwzględniały możliwość zwolnienia lub wstrzymania *Rozpoczęcia produkcji*, jeśli podaż przekraczała popyt z uwzględnionym zapasem. Tym razem nie będzie tej poprawki, dlatego można oczekiwać nadwyżki ilości *Wyroby gotowe* w stosunku do potrzeb modelowanego przedsiębiorstwa. Ważne jest, aby nadwyżka ta nie była zbyt duża.

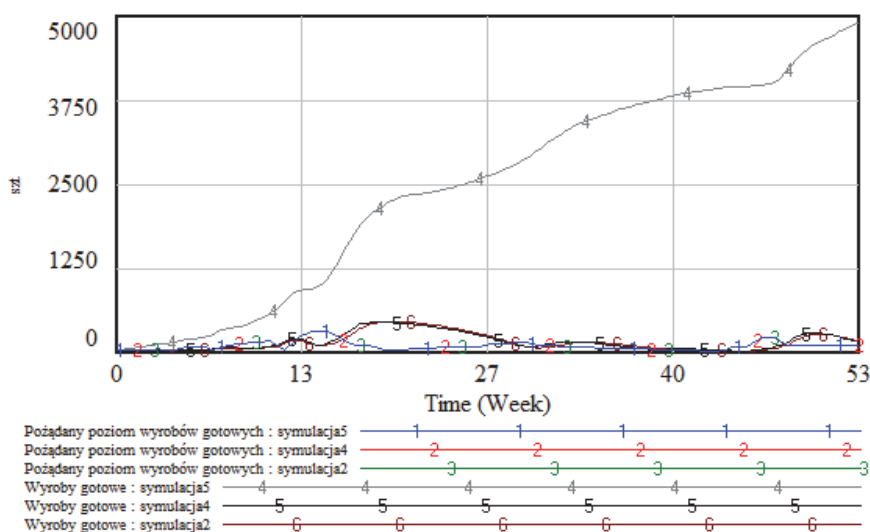
W modelu tym w dalszym ciągu zachowano dodawanie dwutygodniowego zapasu bezpieczeństwa wyrobów gotowych. Fakt ten niesie ze sobą dwojakie skutki, co możemy zobaczyć na rysunkach 4.12 i 4.13. Wykresy te przedstawiają porównanie przebiegów tego modelu (symulacja 5) z zachowaniem dwóch poprzednich modeli (model z *Korektą produkcji* – symulacja 2; model z *Korektą produkcji i Korektą produkcji w toku* – symulacja 4). Skutkiem pozytywnym, widocznym na pierwszym z wykresów, jest całkowite wypełnienie zamówień. Niestety, patrząc na drugi wykres, widzimy, że było to możliwe dzięki wyprodukowaniu takiej ilości wyrobu, która przy utrzymaniu obecnego zakresu wielkości zamówień (maksymalnie 150 sztuk), nie zostanie nigdy zużyta, a produkcja mimo tego będzie dalej trwać.

Mimo, że *Pożądany poziom wyrobów gotowych* jest niski, brak pętli zwrotnej, regulującej wielkość *Wyrobów gotowych* w magazynie, przy zachowaniu *Czasu bezpiecznego pokrycia* wynoszącego dwa tygodnie, skutkuje marnotrawstwem w postaci nadprodukcji i ponoszonych na nią kosztów. W związku z tym, należy przed określeniem *Czasu bezpiecznego pokrycia*, zastanowić się, jaki poziom *Wyrobów gotowych* w magazynie jesteśmy w stanie utrzymać w razie braku popytu.



Rys. 4.12. Porównanie przebiegów z różnymi wariantami korekt

Źródło: opracowanie własne.



Rys. 4.13. Porównanie przebiegów z różnymi wariantami korekt

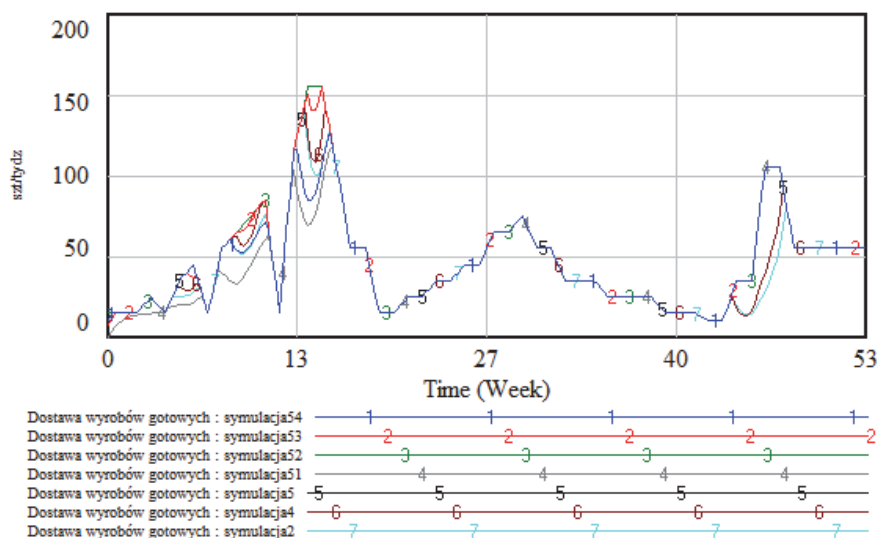
Źródło: opracowanie własne.

Kolejne przeprowadzone symulacje uwzględniają różne rodzaje korekt (symulacje 2-5) i przyjęcie różnych ilości zapasów (symulacje 51-54). Przebiegi z tych symulacji, których krótki opis znajduje się poniżej, przedstawiono na rysunkach 4.14 i 4.15:

- symulacja 2 – *Korekta produkcji*, dwutygodniowy zapas bezpieczeństwa;
- symulacja 4 – *Korekta produkcji* i *Korekta produkcji w toku*, dwutygodniowy zapas bezpieczeństwa;
- symulacja 5 – *Korekta produkcji w toku*, dwutygodniowy zapas bezpieczeństwa;
- symulacja 51 – *Korekta produkcji w toku*, brak zapasu bezpieczeństwa;
- symulacja 52 – *Korekta produkcji w toku*, jednodniowy zapas bezpieczeństwa;
- symulacja 53 – *Korekta produkcji w toku*, półtygodniowy zapas bezpieczeństwa;
- symulacja 54 – *Korekta produkcji w toku*, dziesięć sztuk zapasu bezpieczeństwa.

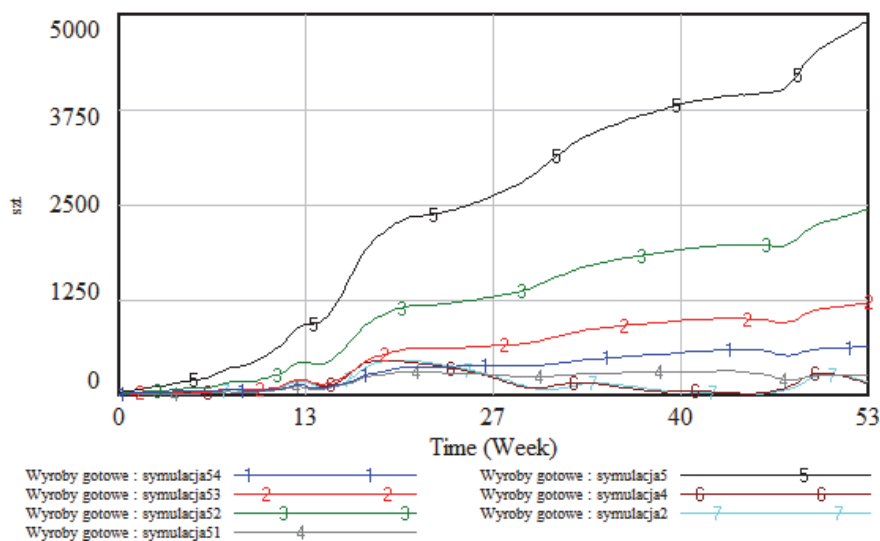
Wcześniej omówione symulacje 2 i 4 przedstawiają modele, które nie zapewniają pełnych dostaw wyrobów gotowych, natomiast symulacja 5 – model, w którym są one zapewnione, kosztem ogromnych zapasów wyrobu. Przeprowadzono kolejne cztery symulacje z przyjęciem różnych zapasów. W przypadku

symulacji 51-53 zmieniano *Czas bezpiecznego pokrycia* na wartości odpowiednio 0,1 i 0,5. Do symulacji 54 zmieniono nieznacznie strukturę modelu, kasując ten parametr i strzałkę tworzącą relację między *Zamówieniami* a *Pożądanym poziomem* wyrobów gotowych. Jednocześnie ostatni z wspomnianych parametrów ustawiono jako stały o wartości 10.



Rys. 4.14. Porównanie przebiegów z różnymi wariantami zapasów i korekt

Źródło: opracowanie własne.



Rys. 4.15. Porównanie przebiegów z różnymi wariantami zapasów i korekt

Źródło: opracowanie własne.

Symulacja 51 przedstawia sytuację, w której całkowicie rezygnujemy z zapewnienia zapasów *Wyrobow gotowych*. Ponieważ *Pożądany poziom wyrobów gotowych* wynosi 0, a poziom ten jest wartością początkową *Wyrobow gotowych*, na samym początku symulacji nie mamy żadnego zapasu i dostawy nie są zapewnione aż do czwartego tygodnia. Również później podaż nie pokrywa popytu, a w całym okresie model z takimi warunkami wypada najniekorzystniej. Znacznym plusem, a zarazem źródłem słabości tej symulacji, jest brak nadprodukcji i konieczności magazynowania nadmiarowej ilości wyrobu. W symulacji 52 przyjęto zapas bezpieczeństwa na okres jednego tygodnia. Mimo wypełnienia wszystkich dostaw, niestety i ten czas okazał się zbyt długim, by niepotrzebnie nie magazynować wyrobu.

W symulacji 53 skrócono więc *Czas bezpiecznego pokrycia* o połowę, do 0,5 tygodnia. Również tym razem, zapasy przy pięćdziesiątym trzecim tygodniu wynosiły ponad 1200 sztuk, co stanowiło w dalszym ciągu zbyt dużą ilość. Jak się również okazało, dostawy przestały być w zapewniane w całości. W ostatniej przeprowadzonej symulacji, oznaczonej numerem 54, zmieniono sposób wyznaczania *Pożądanego poziomu wyrobów gotowych*. Tym razem, zamiast wyliczania tego poziomu zależnego od wielkości zamówienia, przy każdym kroku symulacji ustalono stałą wartość 10 sztuk. Sposób ten okazał się swoistym kompromisem między symulacjami zapewniającymi dostawy w jak największym stopniu, a powodującymi magazynowanie coraz większych ilości wyrobu. Na końcu czasu symulacji, ilość ta wynosiła ponad 600 sztuk, gdzie przy symulacji wyłącznie z korektą produkcji w toku i bez zapasu bezpieczeństwa wynosiła 255 sztuk przy najgorszym wypełnianiu zamówień, a ok. 150-160 sztuk przy symulacjach 2 i 4, które charakteryzują się podobnym, choć niewiele lepszym wypełnianiem zamówień.

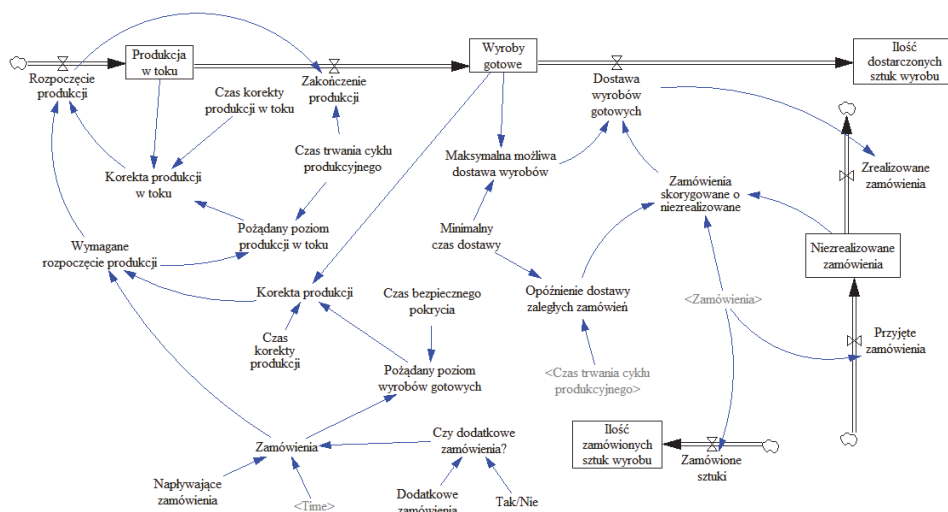
Model ten spełnił stawiane przed nim oczekiwania, a zarazem i obawy. Działanie jest poprawne, ponieważ w pierwszej przeprowadzonej za jego pomocą symulacji wszystkie *Zamówienia* zostały wypełnione. Niestety, jak przewidywano, wystąpiła nadwyżka *Wyrobow gotowych*. Jest ona zbyt duża, by przy danych parametrach zaakceptować model. Popyt nie wystarcza na zmniejszanie zapasów, zwłaszcza gdy produkcja jest stale uruchamiana, ponieważ nie kontroluje się stanu magazynu wyrobów gotowych. Po zmianie wartości zmiennych odpowiedzialnych za wyliczanie dodatkowego zapasu, zmniejszano wartość nadwyżki gotowego wyrobu przy kolejnych symulacjach. Pomimo tych działań nadwyżka ciągle występowała i miała tendencję niemalejącą. Model jest poprawny, jednak nie taki, jakiego oczekujemy jako skutecznego narzędzia stosowanego w przedsiębiorstwie produkcyjnym.

Po porównaniu tych modeli i zastosowanych w nich parametrów, do dalszego rozwijania modelu wybrano opcję z dwoma korektami (*Korekta produkcji* i *Korekta produkcji w toku*), z przyjęciem dwutygodniowego zapasu bezpieczeństwa wyrobu gotowego.

4.2. Model produkcja – zbył z uwzględnieniem niezrealizowanych zamówień

Poprzednie modele nie rozpatrywały korekty kolejnych dostaw o wyroby wcześniej nie wysłane. W tym wyliczany jest poziom *Niezrealizowanych zamówień*, który wpływa na *Dostawę wyrobów gotowych*. Poziom ten jest całą różnicy strumienia wejściowego *Przyjęte zamówienia* i *Zrealizowane zamówienia*. *Przyjęte zamówienia* są równe *Zamówieniom*, czyli liczbie zamówionych przez klientów sztuk na tydzień, wraz z dodanymi *Dodatkowymi zamówieniami*. *Zrealizowane zamówienia* mają taką samą wartość jak *Dostawa wyrobów gotowych*, i tak jak ona jest to strumień oznaczający tempo dostaw wyrobów gotowych do klientów. Poziom *Niezrealizowanych zamówień* świadczy o ilości niedostarczonych produktów. Wcześniej dostawy były uzależnione od ilorazu liczby *Wyrobow gotowych* i *Minimalnego czasu dostawy* oraz liczby sztuk w aktualnym zamówieniu. Pierwsza część tej definicji pozostała bez większych zmian (obecnie, aby uprościć zapis równania, wprowadzono zmienną *Maksymalna możliwa dostawa wyrobów*, zdefiniowaną jak pierwsza część poprzedniej definicji *Dostawy wyrobów gotowych*), natomiast druga zmienna to *Zamówienia skorygowane o niezrealizowane*. Jeśli nie stwierdzono występowania niedostarczonych wyrobów (*Niezrealizowane zamówienia* mają wartość mniejszą od zera), parametr ten przyjmuje wartość *Zamówień* i model działa jak poprzedni. W innym przypadku, jest to wartość opóźnienia wykładniczego pierwszego stopnia aktualnie zamawianej liczby wyrobu zwiększonej o iloraz *Niezrealizowanych zamówień* i *Opóźnienia dostawy zaległych zamówień*. Czas tego opóźnienia, będący jednocześnie czasem *Opóźnienia dostawy zaległych zamówień*, wynosi tyle, ile w danym przedsiębiorstwie trwa cykl produkcyjny wraz z minimalnym czasem dostawy. Zasoby *Ilość zamówionych sztuk wyrobu* i *Ilość dostarczonych sztuk wyrobu* są to również całki, kumulujące wartość strumieni wchodzących, gdzie są to odpowiednio *Zamówione sztuki* – zdefiniowane tak samo jak *Przyjęte zamówienia* – i *Dostawa wyrobów gotowych*. Poziomy te dodano jako wskaźniki stopnia wypełniania zamówień klientów. Aby porównać działanie tego modelu z wcześniejszą jego wersją (model z *Korektą produkcji w toku* i *Korektą produkcji*, lecz bez uwzględniania niezrealizowanych zamówień), w tym drugim dodano poziom *Ilości dostarczonych sztuk wyrobu*, zdefiniowany w ten sam sposób. *Ilość zamówionych sztuk wyrobu* jest poziomem, który ma takie same wartości dla wszystkich modeli.

Rysunek 4.16 przedstawia schemat modelu, natomiast tabela 4.5 zawiera definicje użytych zmodyfikowanych oraz nowych zmiennych i stałych.



Rys. 4.16. Model symulacyjny produkcja – zbył z uwzględnieniem
Niezrealizowanych zamówień
Źródło: opracowanie własne.

Tabela 4.5. Zmienne i stałe w modelu produkcja – zbył z uwzględnieniem
Niezrealizowanych zamówień

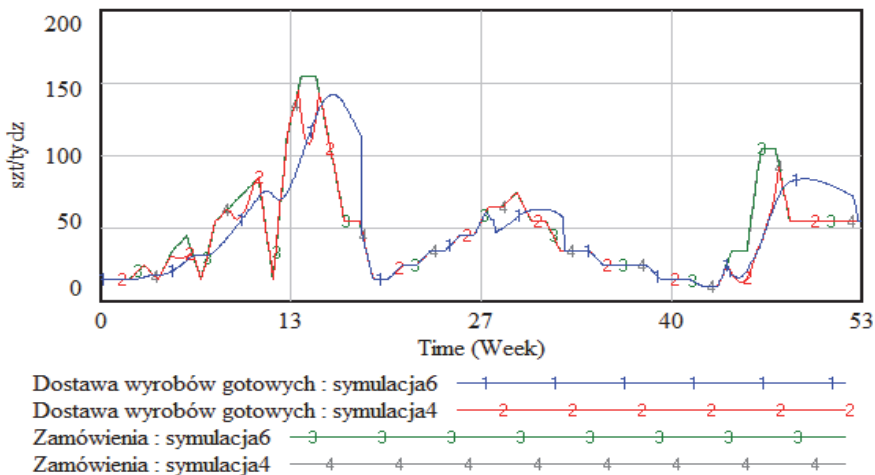
Nazwa zmiennej/stałej	Definicja	Jednostka
Maksymalna możliwa dostawa wyrobów	Wyroby gotowe / Minimalny czas dostawy	[szt./tydz.]
Dostawa wyrobów gotowych	MIN (Maksymalna możliwa dostawa wyrobów, Zamówienia skorygowane o niezrealizowane)	[szt./tydz.]
Zamówienia skorygowane o niezrealizowane	IF THEN ELSE (Niezrealizowane zamówienia >= 0, DELAY1 ((Niezrealizowane zamówienia / Opóźnienie dostawy zaległych zamówień) + Zamówienia, Opóźnienie dostawy zaległych zamówień), Zamówienia)	[szt./tydz.]
Opóźnienie dostawy zaległych zamówień	Czas trwania cyklu produkcyjnego + Minimalny czas dostawy	[tydz.]
Niezrealizowane zamówienia	INTEG (Przyjęte zamówienia – Zrealizowane zamówienia) Wartość początkowa: 0	[szt.]
Zrealizowane zamówienia	Dostawa wyrobów gotowych	[szt./tydz.]
Przyjęte zamówienia	Zamówienia	[szt./tydz.]
Zamówione sztuki	Zamówienia	[szt./tydz.]
Ilość zamówionych sztuk wyrobu	INTEG (Zamówione sztuki) Wartość początkowa: 0	[szt.]
Ilość dostarczonych sztuk wyrobu	INTEG (Dostawa wyrobów gotowych) Wartość początkowa: 0	[szt.]

Źródło: opracowanie własne.

Zadaniem tego modelu jest branie pod uwagę zaległych zamówień podczas realizacji zamówień bieżących. Oceniane będzie to na podstawie porównania

Ilości dostarczonych i zamówionych sztuk wyrobu. Jeśli układ nie będzie w ogóle dążył do uzyskania podobnych wartości, biorąc pod uwagę jedynie zamówienia aktualne, będzie to model nieprawidłowy. O poprawności nie będzie decydowało to, czy porównywane ilości są jednakowe na samym końcu rozpatrywanego horyzontu czasowego, ponieważ może być to akurat moment tuż przed lub tuż po wypełnieniu wszystkich *Zamówień*. Ważne będzie ogólne zachowanie układu.

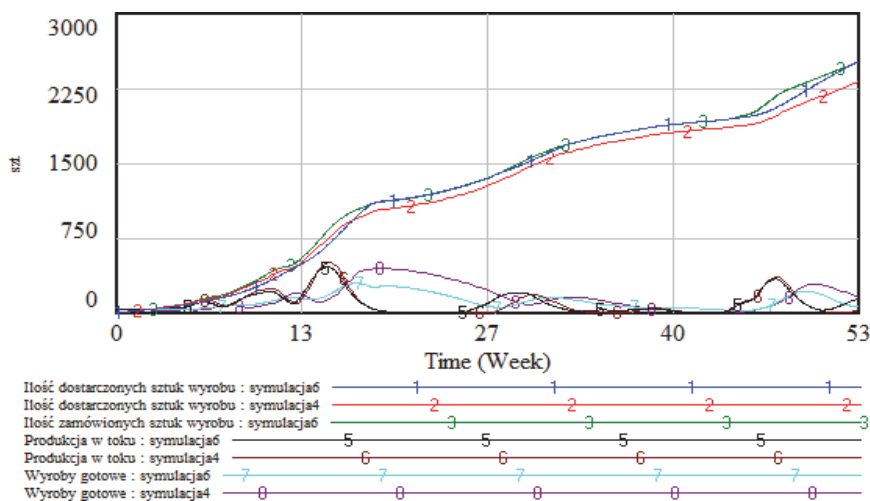
Rysunek 4.17 przedstawia przebiegi *Zamówień* i *Dostaw wyrobów gotowych* modeli z *Korektą produkcji* i *Korektą produkcji w toku*. Symulacja 6 dotyczy modelu, w którym uwzględniono wcześniej niezrealizowane zamówienia, natomiast symulacja 4 modelu bez tej funkcjonalności, omówionego wcześniej. W przypadku symulacji 6 łatwo zauważyć, że dostawy nie były początkowo zapewnione w pełnym wymaganym zakresie od momentu, w którym popyt uległ zmianie. Widać przesunięcie w czasie pomiędzy terminem, w którym wyroby powinny być dostarczone, a terminem, w którym zostało to wykonane. Po nagłym spadku popytu, ilość wyrobów gotowych pokryła ponownie zapotrzebowanie do ok. dwudziestego siódmego tygodnia. Po ponownym spadku popytu, dostawy zostały nadrobione. Przy ostatnim skoku *Zamówień* już na samym początku trwania tego skoku, zapas wyrobu był zbyt mały, by pokryć zapotrzebowanie. Przy końcu czasu symulacji, ilość *Zamówień* ustaliła się na stałym poziomie, co pozwoliło przedsiębiorstwu znowu doprowadzić do wysyłki wszystkich zamówionych sztuk wyrobu.



Rys. 4.17. Porównanie przebiegów z i bez uwzględnienia *Niezrealizowanych zamówień*
Źródło: opracowanie własne.

Poziomy *Ilość zamówionych sztuk wyrobu* oraz *Ilość dostarczonych sztuk wyrobu* zostały wprowadzone, aby wyraźnie zobaczyć działanie pętli zwrotnej od *Dostawy wyrobów gotowych* i porównać działanie tego modelu (symulacja 6)

z poprzednim, gdy tej pętli nie było (symulacja 4). Dla obu modeli, ilość zamówionych sztuk wyrobu była taka sama. Wykresy narastania obu zasobów zostały przedstawione na rysunku 4.18, razem z przebiegami *Produkcji w toku* oraz ilości *Wyrobow gotowych*.



Rys. 4.18. Porównanie przebiegów z i bez uwzględnienia *Niezrealizowanych zamówień*

Źródło: opracowanie własne.

Widoczne jest, że ilości wyrobów dostarczonych i zamówionych, w ostateczności odbiegają od siebie w przypadku, gdy brakuje uwzględnienia *Niezrealizowanych zamówień*. Początkowo model ten lepiej dopasowywał się do popytu, lecz z czasem, minimalna różnica między popytem a podażą narastała. Dla tej symulacji, wykresy ilości dostarczonych i zamówionych sztuk, biegają niemalże równolegle. Niewystarczający poziom produkcji oraz niezajmowanie się zaległymi wysyłkami doprowadziło do niedostarczenia ok. 200 sztuk produktu. W przypadku symulacji 6 rozbieżność ta nie była tak drastycznie duża, wynosiła ok. jedną sztukę. Można zauważyć, że ilość dostarczonych sztuk wyrobu chociaż początkowo odbiegała od ilości sztuk zamówionych, to ok. osiemnastego tygodnia wyrównała się, a produkcja nadążała za popytem, aż do ok. dwudziestego siódmego tygodnia. W tym czasie produkcja w toku zeszła niemal do zera, by wzrosnąć dopiero ok. dwudziestego piątego tygodnia, w odpowiedzi na ciągły wzrost popytu. Jak zostało wcześniej wspomniane, w tym czasie popyt wciąż narastał, a zapas wyrobów gotowych zmalał. Podobna sytuacja miała miejsce pomiędzy tygodniami 43-51. Warto zauważyć, że ilość *Wyrobow gotowych* w symulacji 4 ma większe wahania, niż w symulacji 6. Oznacza to, że mogą pojawić się momenty, w których pomimo braku wypełnionych wcześniejszych

zamówień, magazyn będzie zapełniony, a zamówienia w dalszym ciągu nie będą dostarczane.

Model został oceniony jako spełniający stawiane mu wymagania. Dążył do wyrównania wartości *Ilości zamówionych* i *dostarczonych sztuk wyrobu*. Po okresach, gdy ilość zamawianych wyrobów przewyższała możliwą ilość dostarczanych wyrobów, następowały wysyłki zawierające produkty wcześniej niedostarczone. Ponadto, w chwili zakończenia symulacji *Ilość zamówionych* i *dostarczonych sztuk wyrobu* była taka sama.

W rozważanym modelu, sposób obliczania ilości zamówień niezrealizowanych odbywa się na tej samej zasadzie, co w pracach autorów: P. Georgiadis i C. Michaloudis⁶⁴ oraz M. Özbayrak, T.C. Papadopoulou i M. Akgun⁶⁵. W porównaniu z modelem przedstawionym przez Stermana⁶⁶, model przedstawiony tutaj jest uproszczony. Bazuje jedynie na danych pozyskanych z działania modelu, a nie wymaga wprowadzania konkretnych danych dla każdego przedsiębiorstwa. Inny przykład przekształcenia modelu Stermana, już dla konkretnej firmy, zaprezentowały M. Baran i J. Stecko⁶⁷. W ich przypadku model jest bardziej rozbudowany, zauważalną różnicą jest uwzględnienie korekty ilości wymaganych do wyprodukowania sztuk na dany okres, jako składnika dodawanego do ilości, które muszą być wyprodukowane przez konkretny okres produkcyjny. W tej pracy zrezygnowano z zastosowania tej korekty, gdyż była ona zbyt duża przy zastosowanym rozwiązaniu – wymagana wysyłka została już poprawiona uwzględniając odpowiednie opóźnienie. W modelu M. Baran i J. Stecko nie zastosowano ponadto korekty *Wyrobów gotowych* i nie przewidziano zadawania produkcji zapasu wyrobu.

4.3. Podstawa modelu zaopatrzenie – produkcja – zbył

Aby system produkcyjny spełniał swoje zadanie, musi być zaopatrzony w odpowiednie wejścia. W poprzednich modelach, aby usunąć ewentualny negatywny wpływ braku zasobów, założono, że są one nieograniczone. W rzeczywistości trudno jednak o takie sytuacje. W rozdziale 0 przedstawiono zasoby, które są

⁶⁴ P. Georgiadis, Ch. Michaloudis, *Real-time production planning and control system for job-shop manufacturing: A system dynamics analysis*, „European Journal of Operational Research”, 2012, 216, ss. 94-104.

⁶⁵ M. Özbayrak, T. C. Papadopoulou, M. Akgun, *Systems dynamics modelling of a manufacturing supply chain system*, „Simulation Modelling Practice and Theory”, 2007, 15, ss. 1338-1355.

⁶⁶ J.D. Sterman, *Business Dynamics: Systems Thinking and Modeling for a Complex World*, Irwin/McGraw-Hill, Boston 2000, ss. 723-725.

⁶⁷ M. Baran, J. Stecko, *Symulacyjny model produkcja – zbył w konwencji metody dynamiki systemów przypadek przedsiębiorstwa Fotosystem*, „Modern Management Review”, 2014, XIX/21, (1/2014), ss. 7-23.

niezbędne do produkcji. W kolejnych rozdziałach tej pracy model produkcja – zbyt będzie rozszerzany o wybrane czynniki wejściowe wraz z ich ograniczeniami, gdy pozostałe całe czas będą uznane za nielimitowane. Nie będą brane pod uwagę utrudnienia produkcji wynikające z niedostępności czynników energetycznych, informacji i środków finansowych.

4.3.1. Model z uwzględnieniem zaopatrzenia w przedmioty pracy – stała wartość dostępnych surowców

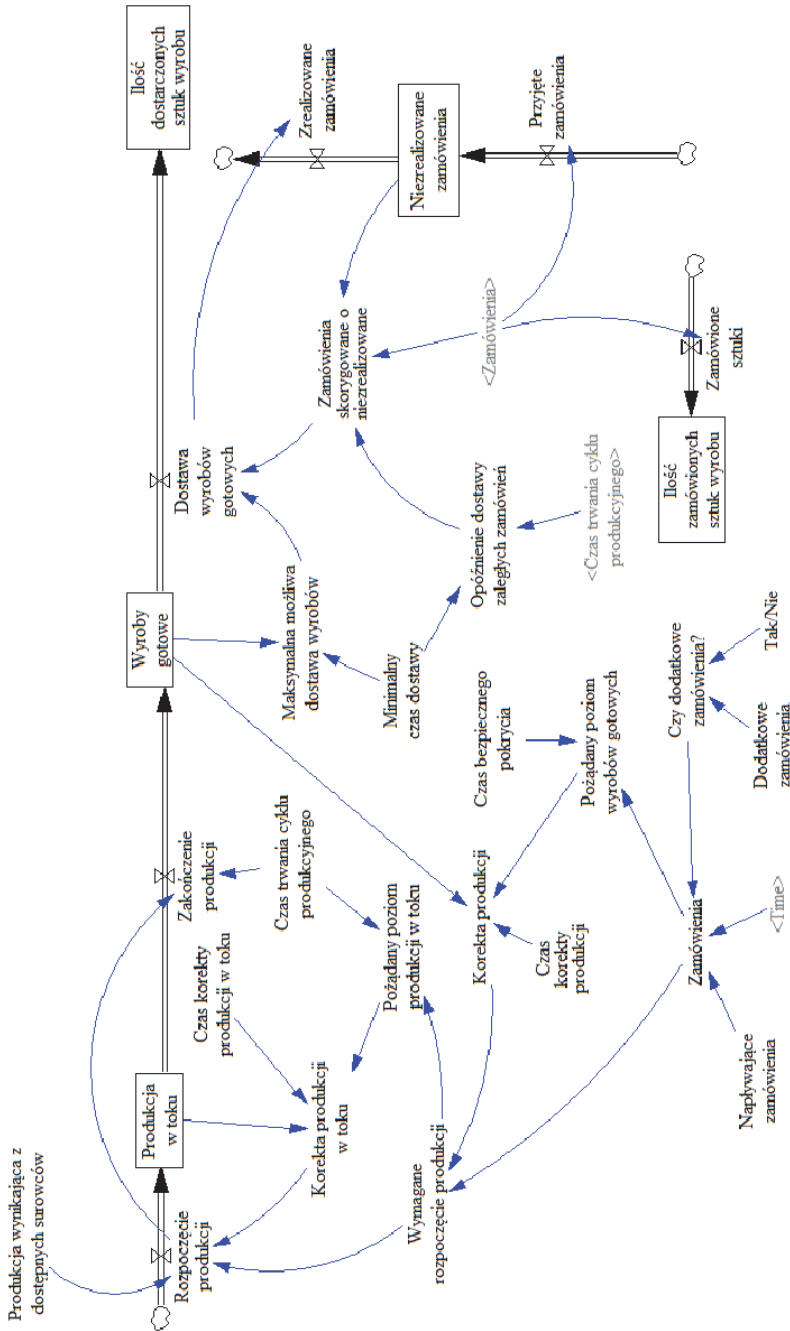
Pierwszym zasobem branym pod uwagę są przedmioty pracy. Są to wszelkie surowce, półfabrykaty i materiały, z których w wyniku produkcji lub montażu powstaje gotowy wyrób. W modelach tej pracy, przedmioty pracy zostaną określone surowcem, co w rzeczywistości może być odniesione np. do półwyrobu, który podobnie jak surowiec, musi być dostarczony w odpowiedniej ilości i czasie. Tak jak przy wysyłce wyrobów gotowych, zakładamy, że surowiec nie jest dostarczany w określonych partiach. Gdy wprowadzimy dwa rodzaje surowców, nie bierzemy pod uwagę, od którego dostawcy pochodzi jaki surowiec. Oznacza to, że w przypadku, gdy podczas jednoczesnej dostawy dwóch rodzajów surowca wystąpi opóźnienie, to w modelu należy podać to opóźnienie dla każdego z tych dwóch surowców.

Modyfikacja modelu wprowadza stałą wartość *Produkcji wynikającej z dostępnych surowców*. Jest to parametr, który ogranicza wielkość produkcji, która ma być rozpoczęta. Zakładamy, że w każdej chwili posiadamy odpowiednią ilość surowców do wyprodukowania stałej ilości wyrobów. Pozwala nam to rozróżnić się, jaka będzie wystarczająca maksymalna zdolność produkcyjna do jak najbardziej terminowej realizacji zamówień przy jak najmniejszych wahaaniach wielkości produkcji. Schemat modelu oraz definicje nowego i zmienionego parametru zaprezentowano na rysunku 4.19 oraz w tabeli 4.6.

Tabela 4.6. Zmienne i stałe w podstawowym modelu z ograniczeniem produkcji przez ilość dostępnych surowców

Nazwa zmiennej/stałej	Definicja	Jednostka
Rozpoczęcie produkcji	MIN (Produkcja wynikająca z dostępnych surowców, MAX (0, Wymagane rozpoczęcie produkcji + Korekta produkcji w toku))	[szt./tydz.]
Produkcja wynikająca z dostępnych surowców	Stała zależna od przedsiębiorstwa Zastosowano: 50, 100, 150, 200, 250	[szt./tydz.]

Źródło: opracowanie własne.

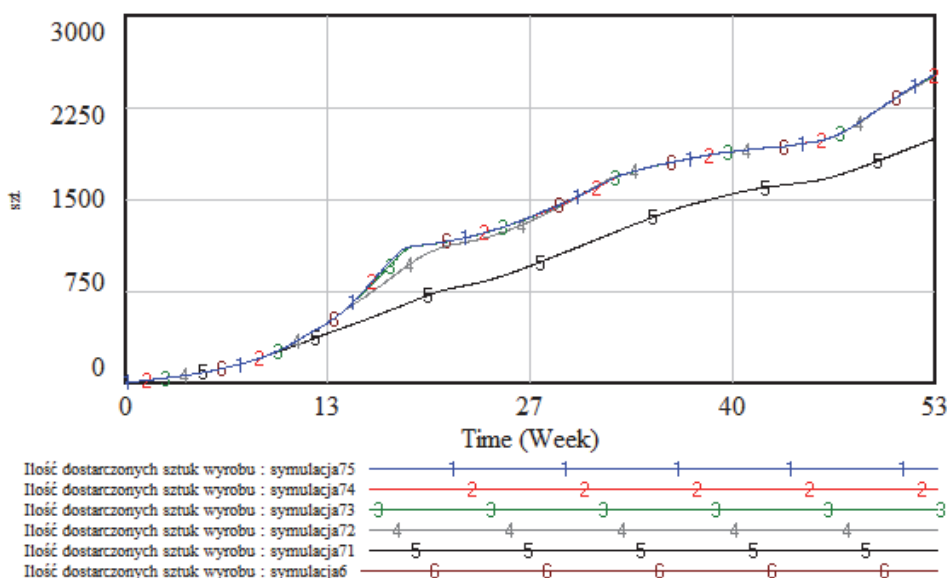


Rys. 4.19. Model z stałym ograniczeniem produkcji przez ilość dostępnych surowców
Źródło: opracowanie własne.

Oczekujemy, że model będzie zachowywał się niemalże tak samo, jak model poprzedni. Różnica powinna być widoczna przy ograniczeniu *Rozpoczęcia produkcji* poniżej wymaganej wartości. Wtedy wartość *Produkcji w toku* powinna zachowywać się zgodnie z przebiegiem *Zamówień*, ale nie wykroczyć powyżej wartości ograniczenia. *Produkcja w toku* po napotkaniu ograniczenia, gdy wartość *Zamówień* wraz z uwzględnionymi zamówieniami zaległymi w dalszym ciągu wymagałaby utrzymania produkcji, powinna utrzymywać się na poziomie wartości ograniczenia, lub niewiele od niego mniejszym, aż do czasu zmniejszenia różnicy między *Ilością zamówionych* a *dostarczonych sztuk wyrobu*.

Na rysunkach 4.20 i 4.21, przedstawiono wykresy *Produkcji w toku* oraz *Ilości dostarczonych sztuk wyrobu* dla symulacji 6 – gdy nie nałożono ograniczenia produkcji przez ilość dostępnych surowców – oraz symulacji 71-75 – z takim ograniczeniem. Założono, że w każdej chwili można rozpocząć produkcję wynoszącą maksymalnie odpowiednio:

- symulacja 71 – 50 sztuk na tydzień;
- symulacja 72 – 100 sztuk na tydzień;
- symulacja 73 – 150 sztuk na tydzień;
- symulacja 74 – 200 sztuk na tydzień;
- symulacja 75 – 250 sztuk na tydzień.



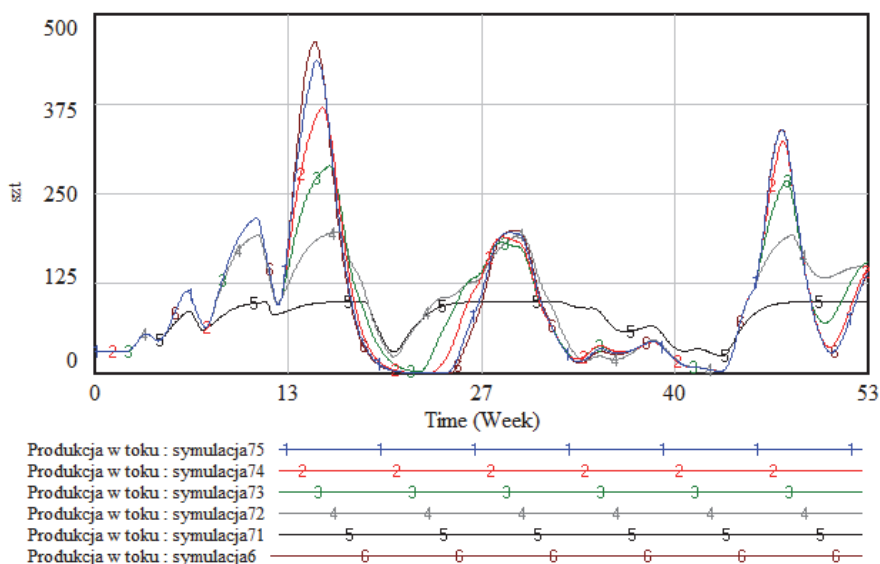
Rys. 4.20. Porównanie przebiegów z i bez ograniczenia
Produkcji wynikającej z dostępnych surowców
Źródło: opracowanie własne.

Z powyższego wykresu widać, że ograniczenie produkcji do maksymalnie 50 sztuk wyrobu na tydzień jest niewystarczające, by spełnić oczekiwania klientów. Przy maksymalnej produkcji 100 sztuk na tydzień, między piętnastym a dwudziestym ósmym tygodniem ilość dostarczonych sztuk jest widocznie mniejsza od oczekiwanej, jednak w późniejszym czasie dochodzi do nadrobienia tej różnicy, by w ostateczności w pięćdziesiątym trzecim tygodniu wyniosła ona ok. dziewięć sztuk. Nie jest to różnica duża, ale z uwagi, że przy krótszym horyzoncie czasowym mogłoby nie dojść do nadrobienia rozbieżności między ilością wyrobów zamówionych i dostarczonych, również ten wariant nie jest korzystny przy dobranych wielkościach w modelu. Podobnie jest w przypadku symulacji 73, gdzie różnica między piętnastym a dziewiętnastym tygodniem jest jeszcze mniejsza, a w pięćdziesiątym trzecim tygodniu wynosi ok. pięć sztuk. Należy zatem w tym przypadku wybrać między ograniczeniem do 200 lub 250 sztuk na tydzień. W obu przypadkach przebiegi są bardzo zbliżone do wartości symulacji 6, wcześniej wybranej jako satysfakcjonującej. W pięćdziesiątym trzecim tygodniu w przypadku symulacji 75, *Ilość dostarczonych sztuk wyrobu* nieznacznie (ok. 0,5 sztuki) przewyższa przewidzianą dostawę, zaś przy ograniczeniu nałożonym w symulacji 74, ilości te niemal się pokrywają.

W rzeczywistych warunkach ilości surowca i idącą za tym maksymalną zdolność produkcyjną wynikającą z jego ilości, trudno utrzymać ciągle na stałym poziomie. Aby posiadać odpowiednią ilość surowca, należy mieć odpowiednie zasoby finansowe, zależące od kosztów zakupu i magazynowania surowca. Trzeba się liczyć z możliwością braku płynności dostaw, a zatem magazyn powinien pomieścić oprócz zapasu bieżącego, również pewien zapas minimalny. Wiąże się to z kosztami, które zależą od miejsca i powierzchni, która jest potrzebna na przechowywanie surowca oraz warunków, w których musi przebywać. Bezpieczniej jest zatem przyjąć jak najmniejszą wartość parametru *Produkcja wynikająca z dostępnych surowców*. Przemawia za tym również to, że im większa wartość maksymalnej produkcji, tym większe niezrównoważenie produkcji w toku. Jeśli możliwa jest duża, skokowa produkcja, to w pewnym momencie może również nastąpić przestój. Przy wykorzystywaniu ludzi bądź maszyn, może się to łączyć z faktem potrzeby wykorzystania naprzemiennie bardzo dużej ilości maszyn i pracowników oraz ich kompletnym brakiem zapotrzebowania. Trudno wymagać od rzeczywistego przedsiębiorstwa tak elastycznego dopasowywania się do wymaganej wielkości produkcji w toku, biorąc pod uwagę konieczność odpowiedniego zapewnienia pozostałych zasobów. Na rysunku 4.21 przedstawiono przebiegi *Produkcji w toku* przy różnych ograniczeniach.

Przy symulacji 71 *Produkcja w toku* wykazuje największą stałość, kolejne symulacje charakteryzują się większymi skokami. Są one tym większe, im większe jest ograniczenie. Kierując się wcześniej wspomnianymi argumentami, najbardziej uzasadnione jest wybranie symulacji 74 z ograniczeniem do produkcji 200 sztuk na tydzień.

Wybór takiego ograniczenia nie dziwi, jeśli zwrócimy uwagę, na wartości osiągane przez *Zamówienia*. Wahają się one w przedziale 10-150 sztuk na tydzień, a dodając dodatkowe zamówienia – 15-155 sztuk na tydzień. Jeśli więc nałożone będzie ograniczenie do 150 sztuk na tydzień, czyli tyle ile maksymalna wielkość *Zamówień*, przy niezrealizowaniu któregoś z zamówień (lub zwiększenia wartości *Dodatkowych zamówień*), przedsiębiorstwo nie będzie w stanie w szybkim tempie nadrobić zaległości produkcyjnych. Zadając ograniczenie mniejsze od maksymalnej wielkości *Zamówień*, prawdopodobieństwo wystąpienia niezrealizowanych zamówień wzrasta tym bardziej, im silniejsze jest ograniczenie. Zgodnie z wyżej wspomnianymi przesłankami ekonomicznymi, należy więc przyjąć taką wartość maksymalnej możliwej liczby sztuk do wyprodukowania w danym przedziale czasu, aby była ona większa niż maksymalne spodziewane wymagane tempo produkcji wynikające z popytu i na tyle mała, by nie stwarzała problemów finansowych przedsiębiorstwu.



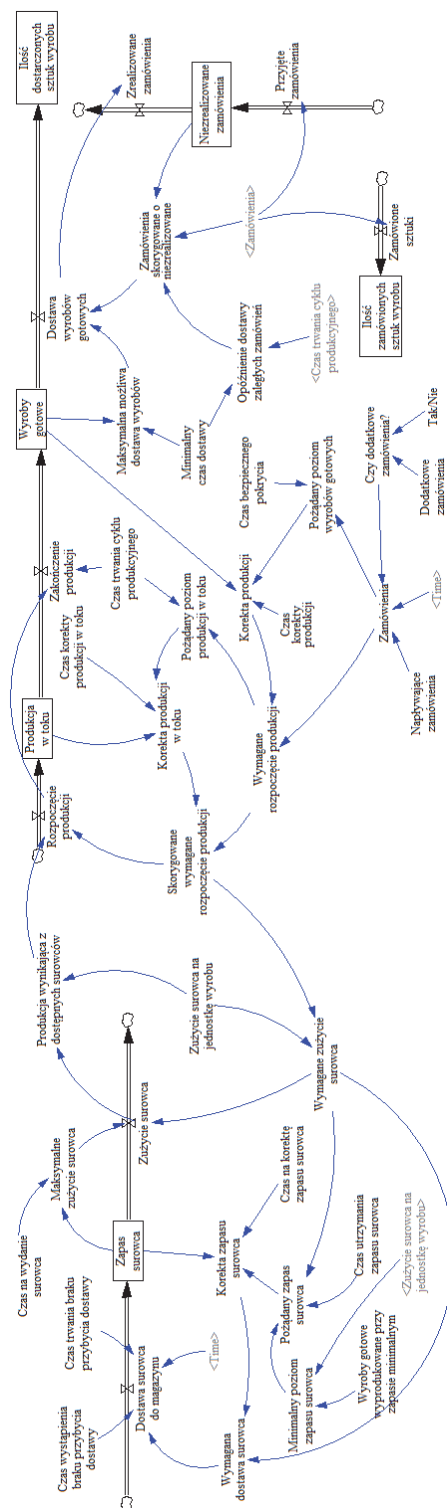
Rys. 4.21. Porównanie przebiegów z i bez ograniczenia
Produkcji wynikającej z dostępnych surowców
Źródło: opracowanie własne.

Model działa w sposób oczekiwany. Zależnie od wielkości ograniczenia, *Produkcja w toku* nie wykracza poza żadaną wielkość i reaguje odpowiednio na zmiany *Zamówień* oraz ilość *Niezrealizowanych zamówień*.

4.3.2. Model z uwzględnieniem zaopatrzenia w przedmioty pracy – zmienna wartość dostępnych surowców

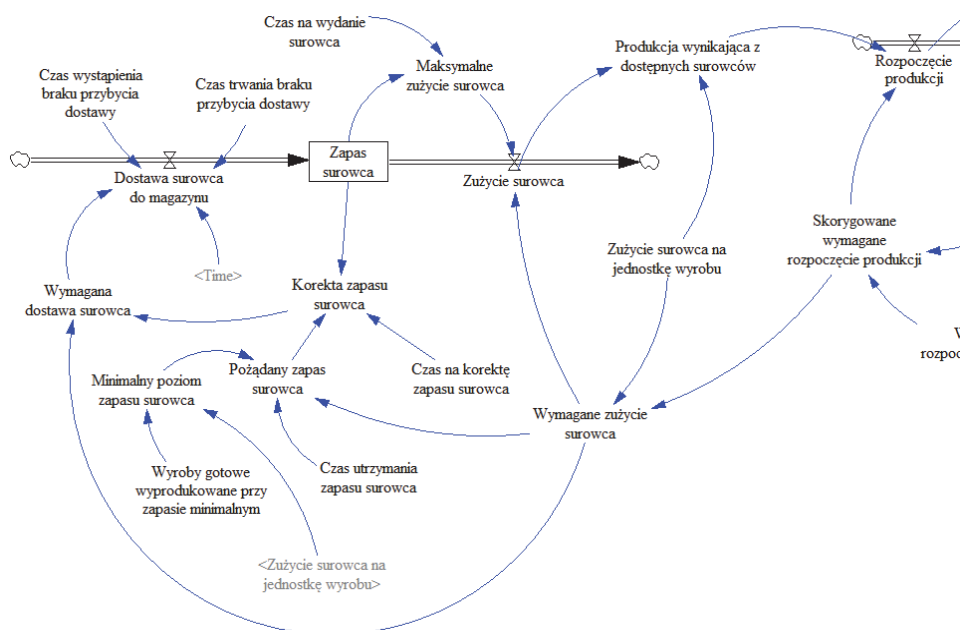
Kolejna rozbudowa modelu wprowadza symulowanie zmiennej wartości *Produkcji wynikającej z dostępnych surowców*. Na podstawie prac M. Baran, J. Stecko i J. D. Stermana, zmodyfikowano proponowane przez nich modele przez wprowadzenie dodatkowych parametrów. By połączyć model produkcja – zbyt z modelem zaopatrzenia, zmieniono zmienną z poprzedniego modelu (*Rozpoczęcie produkcji*), rozbijając jej definicję na dwie. Jedna z części utworzyła nowy parametr łączący modele (*Skorygowane wymagane rozpoczęcie produkcji*). Część poprzedniej definicji *Rozpoczęcia produkcji* odpowiadająca za niepozwo- lenie na przyjmowanie wartości ujemnych tempa w jakim ma się odbywać pro- dukcja przypadła na nową zmienną. Część odpowiadająca za wybór minimalnej wartości pomiędzy wymaganym i maksymalnym tempem produkcji definiuje na nowo *Rozpoczęcie produkcji*.

Na rysunku 4.22 przedstawiono pogląd na oba połączone modele. Rysu- nek 4.23 prezentuje część odpowiedzialną za symulację zaopatrzenia w surowce. W tabeli 4.7 umieszczono definicje nowych i zmienionych parametrów.



Rys. 4.22. Model ze zmiennym ograniczeniem produkcji przez ilość dostępnych surowców zaopatrzenia w przedmioty pracy – produkcja – zbył

Źródło: opracowanie własne.



Rys. 4.23. Model ze zmiennym ograniczeniem produkcji przez ilość dostępnych surowców

Źródło: opracowanie własne.

Tabela 4.7. Zmienne i stałe w zmodyfikowanym modelu z ograniczeniem produkcji przez ilość dostępnych surowców

Nazwa zmiennej/stałej	Równanie	Jednostka
Rozpoczęcie produkcji	MIN (Produkcja wynikająca z dostępnych surowców, Skorygowane wymagane rozpoczęcie produkcji)	[szt./tydz.]
Skorygowane wymagane rozpoczęcie produkcji	MAX (0, Korekta produkcji w toku + Wymagane rozpoczęcie produkcji)	[szt./tydz.]
Produkcja wynikająca z dostępnych surowców	Zużycie surowca / Zużycie surowca na jednostkę wyrobu	[szt./tydz.]
Zużycie surowca na jednostkę wyrobu	Zależnie od przedsiębiorstwa Zastosowano: 1, 2	[szt./szt.]
Dostawa surowca do magazynu	IF THEN ELSE (Czas trwania braku przybycia dostawy > 0, IF THEN ELSE(Czas wystąpienia braku przybycia dostawy <= Time: AND: Time < (Czas trwania braku przybycia dostawy + Czas wystąpienia braku przybycia dostawy), 0, Wymagana dostawa surowca), Wymagana dostawa surowca)	[szt./tydz.]
Zapas surowca	INTEG (Dostawa surowca do magazynu – Zużycie surowca) Wartość początkowa: Pożyczany zapas surowca	[szt.]
Zużycie surowca	MIN (Maksymalne zużycie surowca, Wymagane zużycie surowca)	[szt./tydz.]

Nazwa zmiennej/stalej	Równanie	Jednostka
Maksymalne zużycie surowca	Zapas surowca / Czas na wydanie surowca	[szt./tydz.]
Czas na wydanie surowca	Zależnie od przedsiębiorstwa Zastosowano: 0,1, 0,2, 1	[tydz.]
Wymagane zużycie surowca	Skorygowane wymagane rozpoczęcie produkcji * Zużycie surowca na jednostkę wyrobu	[szt./tydz.]
Wymagana dostawa surowca	MAX(0, Wymagane zużycie surowca + Korekta zapasu surowca)	[szt./tydz.]
Korekta zapasu surowca	(Pożądany zapas surowca – Zapas surowca) / Czas na korektę zapasu surowca	[szt./tydz.]
Czas na korektę zapasu surowca	Zależnie od przedsiębiorstwa Zastosowano: 1, 4	[tydz.]
Pożądany zapas surowca	MAX (Minimalny poziom zapasu surowca, Wymagane zużycie surowca * Czas utrzymania zapasu surowca)	[szt.]
Czas utrzymania zapasu surowca	Zależnie od przedsiębiorstwa Zastosowano: 0,5, 1, 2	[tydz.]
Minimalny poziom zapasu surowca	Zużycie surowca na jednostkę wyrobu * Wyroby gotowe wyprodukowane przy zapasie minimalnym	[szt.]
Wyroby gotowe wyprodukowane przy zapasie minimalnym	Zależnie od przedsiębiorstwa Zastosowano: 200	[szt.]
Czas wystąpienia braku przybycia dostawy	Zależnie od przedsiębiorstwa Zastosowano: 13	[tydz.]
Czas trwania braku przybycia dostawy	Zależnie od przedsiębiorstwa Zastosowano: 7	[tydz.]

Źródło: opracowanie własne.

W modelu tym zakładamy cotygodniowe dostawy o zmiennej wielkości. *Produkcja wynikająca z dostępnych surowców* jest to ilość *Zużycia surowca*, czyli tempa faktycznie zużywanego materiału do produkcji, podzielona przez *Zużycie surowca na jednostkę wyrobu*, czyli normę zużycia materiałowego. Ten drugi parametr jest to wartość stała, określająca ilość sztuk (lub opcjonalnie jednostek) potrzebnych przedmiotów pracy do wyprodukowania jednej sztuki wyrobu gotowego. Zakładamy, że jest to techniczna norma zużycia (czyli ilość potrzebna wraz z zakładanym istnieniem powstawania odpadów), gdy chodzi o surowiec poddawany dalszej obróbce, albo dokładna ilość materiału, gdy chodzi o montaż. Norma zużycia wpływa również na wartość *Wymaganego zużycia surowca*. Mnożone są tam *Skorygowane wymagane rozpoczęcie produkcji* i *Zużycie surowca na jednostkę wyrobu*, czyli obliczana jest ilość materiału potrzebnego do produkcji w tempie planowanej produkcji określonej przez zamówienia i korekty. *Pożądany zapas surowca* jest to poziom surowca, do posiadania którego dążymy. Określają go *Minimalny poziom zapasu surowca*, *Wymagane zużycie surowca* oraz *Czas utrzymania zapasu surowca*. *Minimalne zużycie*

surowca to zapas minimalny, przy posiadaniu którego jesteśmy w stanie wyprodukować ustaloną ilość sztuk wyrobu (podaną przez użytkownika w stałej *Wyroby gotowe wyprodukowane przy zapasie minimalnym*) przez jeden tydzień. Zapas minimalny stanowi zabezpieczenie przedsiębiorstwa na wypadek braku dostaw i niemożności uzupełniania zapasu bieżącego, z którego brane są przedmioty pracy wykorzystywane do aktualnej produkcji, lub nieprzewidzianego wzrostu tempa produkcji, a tym samym wyczerpania zapasu bieżącego. *Czas utrzymania zapasu surowca* jest czasem podawanym przez użytkownika, na okres którego chcemy posiadać zapas surowca potrzebnego na produkcję aktualnie wymaganej ilości wyrobu. Czas ten pomnożony przez *Wymagane zużycie surowca* daje nam ilość zapasu, który może być większy od wymaganego zapasu minimalnego. Różnica między *Pożądanym zapasem surowca* a aktualnym *Zapaszem surowca* w magazynie podzielona przez czas liczony od zamówienia surowca do dostarczenia go do magazynu (*Czas na korektę zapasu surowca*) to *Korekta zapasu surowca*. Suma korekty i wymaganego zużycia wpływa na ilość *Wymaganej dostawy surowca*, którą należy zamówić, by wypełnić zamówienia produkcyjne. Nałożone zostało ograniczenie, aby wartości tej zmiennej nie były mniejsze od zera, analogicznie do sposobu liczenia *Skorygowanego wymaganego rozpoczęcia produkcji*. *Dostawa surowców do magazynu* jest strumieniem, który wraz z *Zużyciem surowca* stanowią o poziomie zasobu surowca w magazynie. *Zapas surowca* liczony jest jako całka z obu tych strumieni, z wartością początkową równą *Pożądanemu zapasowi surowca*, analogicznie do poziomu *Produkcji w toku*. Strumień *Zużycia surowca* to jedna z dwóch wielkości: *Wymagane zużycie surowca* lub aktualnie możliwy maksymalny wypływ surowca z magazynu, biorąc pod uwagę chwilowe jego zasoby oraz czas potrzebny na wydanie go z magazynu na produkcję. Dopiero *Zużycie surowca* pozwala stwierdzić, jaka jest obecna możliwa zdolność produkcyjna.

Dodatkowymi elementami są *Czas wystąpienia braku przybycia dostawy* oraz *Czas trwania braku przybycia dostawy*. Pozwalają one zasymulować przypadek, gdy dostawy w ogóle nie docierają do przedsiębiorstwa przez pewien czas. Jest to symulacja jednorazowego zdarzenia, które wystąpiło w tygodniu określonym przez pierwszą wymienioną stałą, trwającego tyle czasu, ile użytkownik poda jako drugą stałą. Jeśli jej wartość wynosi zero (lub użytkownik omyłkowo wprowadzi wartość czasu mniejszą od zera), *Dostawa surowca do magazynu* liczona jest tak samo jak w poprzednim modelu. W przeciwnym razie, wartość tego strumienia wynosi zero tak długo, jak długi okres został wprowadzony do zmiennej *Czas trwania braku przybycia dostawy*, zaczynając w chwili określonej przez *Czas wystąpienia braku przybycia dostawy*.

Można wprowadzić więcej typów surowca, powielając część modelu odpowiedzialną za zaopatrzenia dla każdego z nich oraz pamiętając o połączeniu ze

zmiennymi *Skorygowane wymagane rozpoczęcie* produkcji i *Rozpoczęcie produkcji*. Istnieje możliwość zgrupowania różnych surowców w jeden rodzaj ujęty w modelu, jeśli mają one takie same lub bardzo zbliżone wartości wszystkich parametrów, a w razie braku dostaw jednego z typów surowca, wystąpi brak dostaw innych (jeśli symulujemy również przypadek przerwy w dostawach).

Kiedy mamy stałą wartość ograniczenia, podajemy tą najmniejszą spośród wszystkich rodzajów lub grup przedmiotów pracy – stanowiącą „wąskie gardło”. Przy dynamicznych zmianach ograniczenia, ciężko przewidzieć, który z przedmiotów pracy będzie stanowił największą barierę do rozpoczęcia produkcji. Rozważanie dynamicznych zmian stanów zapasów różnych przedmiotów pracy jest bardziej zbliżone do warunków rzeczywistych.

Oczekujemy od tego modelu, że w przypadku odpowiednio krótkiego czasu potrzebnego na wydanie surowca z magazynu, korektę jego zasobu oraz przy regularnych dostawach, *Rozpoczęcie produkcji* (a za tym cała produkcja oraz zbył) będą zachowywać się tak, jak w przypadku modelu, gdy nie brano pod uwagę zaopatrzenia. Model zostanie uznany za poprawny, jeśli po zmianie jego parametrów, przebiegi będą zmieniać się w oczekiwany sposób. Zmiana *Zużycia surowca na jednostkę wyrobu* powinna spowodować zwiększenie (w przypadku jego zwiększenia) lub zmniejszenie (zmniejszenia) zapotrzebowania na *Wymagane zużycie surowca*, *Pożądanego zapasu surowca*, *Zapasu surowca* (zmiennych, związanych z poziomem surowca). Skrócenie *Czasu na wydanie surowca* powinno podnieść poziom *Maksymalnego zużycia surowca* (wydłużenie – obniżyć). Skrócenie *Czasu na korektę zapasu surowca* powinno zwiększyć skoki w przebiegach zmiennych związanych z wymaganymi dostawami surowca – *Korekta zapasu surowca*, *Wymagana dostawa surowca*, *Dostawa surowca do magazynu*. Im dłuższy będzie *Czas utrzymania zapasu surowca*, tym większe powinny być wartości (również skoki wartości) *Pożądanego zapasu surowca*, i parametrów wiążących się z poziomem, który będzie zamawiany i dostarczony. Jeśli przyjmiemy, że przez wybrany okres czasu materiały nie będą dostarczane, *Dostawa surowca do magazynu* przez ten okres powinna wynosić zero. W tym czasie zapasy surowca znajdujące się w magazynie, powinny być zużywane, aby wykonać nadchodzące zamówienia. W momencie, gdy dostawy zostaną wznowione, układ powinien zadbać, by przy jednoczesnym odbudowaniu wymaganego poziomu zapasów, produkować tyle wyrobów, by realizować obecne i skumulowane zaległe zamówienia. Model powinien również zachowywać różne ograniczenia, jak np. wartość *Zużycia surowca* nie może przekraczać wartości wyliczanej jako *Maksymalne zużycie surowca*.

Z zastosowaniem tego modelu przeprowadzono symulacje różniące się wartościami stałych. Zestawienie symulacji oraz wartości (prócz niezmiennych wartości *Wyroby gotowych wyprodukowanych przy zapasie minimalnym*) dla każdej

z nich zawarto w tabeli 4.8. Symulację 82 ustalono jako symulację, do której odnoszono się przy kolejnych, badając reakcję modelu na zmianę parametrów. Badania przeprowadzano porównując dwie lub trzy symulacje ze sobą:

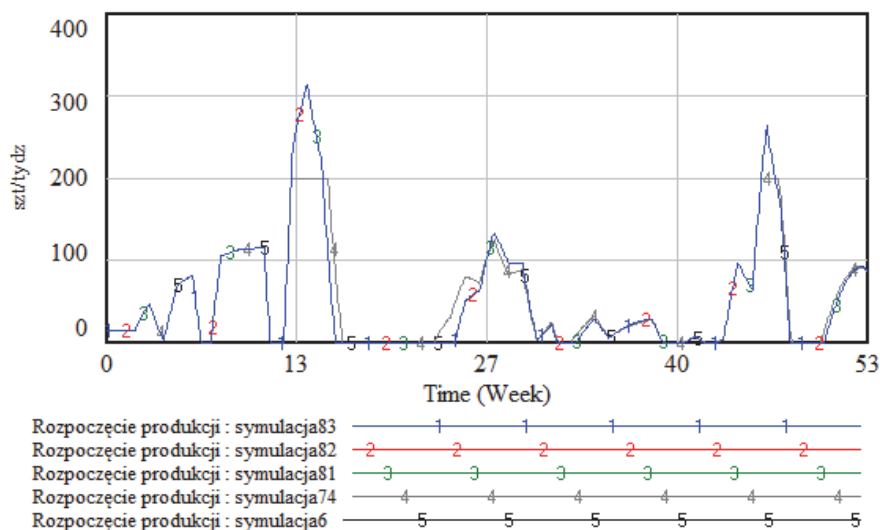
- symulacja 82 z 81 i 83;
- symulacje 82 z 84 i 85;
- symulacja 82 z 86 i 87;
- symulacja 82 z 88.

Tabela 4.8. Wartości stałych w symulacjach w zmodyfikowanym modelu z ograniczeniem produkcji przez ilość dostępnych surowców

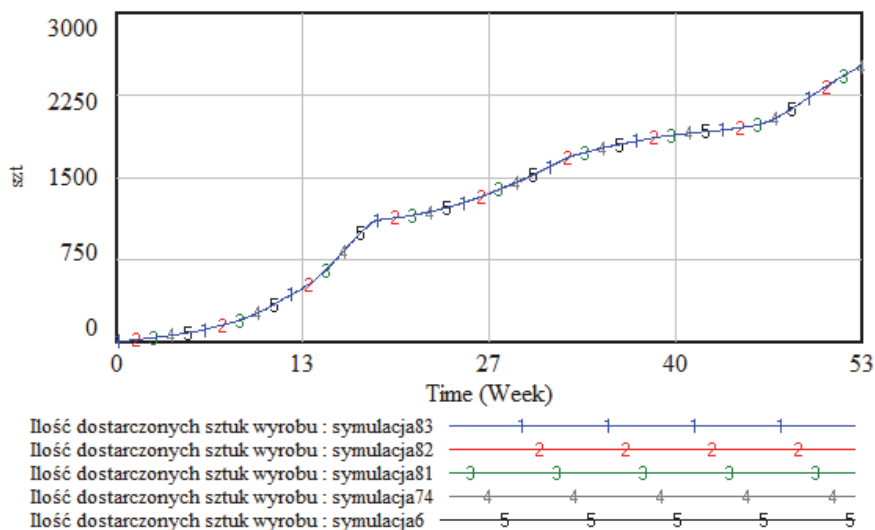
Nazwa symulacji	Nazwa stałej					
	Zużycie surowca na jednostkę wyrobu	Czas na wydanie surowca	Czas na korektę zapasu surowca	Czas utrzymania zapasu surowca	Czas wystąpienia braku przybycia dostawy	Czas trwania braku przybycia dostawy
symulacja 81	1	0,2	1	1	0	0
symulacja 82	1	0,2	4	1	0	0
symulacja 83	2	0,2	4	1	0	0
symulacja 84	1	0,1	4	1	0	0
symulacja 85	1	1	4	1	0	0
symulacja 86	1	0,2	4	0,5	0	0
symulacja 87	1	0,2	4	2	0	0
symulacja 88	1	0,2	4	1	13	7

Źródło: opracowanie własne.

W symulacji 81 ustalono, że do wyprodukowania jednej sztuki wyrobu potrzeba jednej sztuki surowca. Czas potrzebny na wydanie surowca z magazynu przyjęto jako jeden dzień, natomiast czas od złożenia zamówienia do przyjęcia do magazynu i *Czas utrzymania zapasu surowca* wynoszą po jednym tygodniu. Zapas minimalny ma pozwolić na wyprodukowanie 200 sztuk wyrobu w ciągu tygodnia. Nie brano pod uwagę braku dostaw surowca. W dwóch kolejnych symulacjach zmieniano po jednej stałej. W symulacji 82 *Czas na korektę zapasu surowca* wydłużono czterokrotnie, zaś w symulacji 83 podwojono ilość surowca zużywanego na jednostkę wyrobu. Rysunki 4.24 i 4.25 przedstawiają porównanie tych i dwóch poprzednich symulacji. Symulacja 6 to symulacja w modelu bez części zaopatrzeniowej, zaś symulacja 74 w modelu o stałym ograniczeniu produkcji wynoszącej 200 sztuk na tydzień, wynikającej z zaopatrzenia w przedmioty pracy.



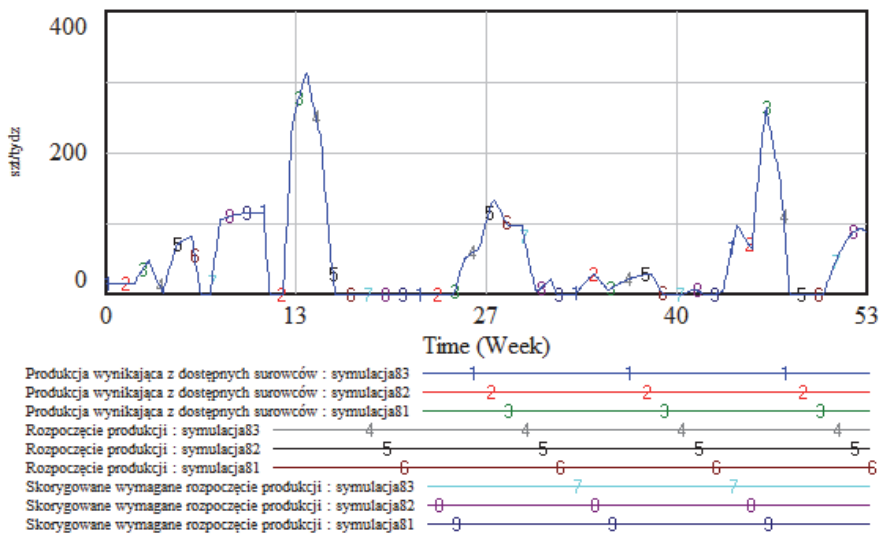
Rys. 4.24. Porównanie przebiegów bez i z różnymi rodzajami ograniczenia
Produkcji wynikającej z dostępnych surowców
Źródło: opracowanie własne.



Rys. 4.25. Porównanie przebiegów bez i z różnymi rodzajami ograniczenia
Produkcji wynikającej z dostępnych surowców
Źródło: opracowanie własne.

Wartości *Rozpoczęcia produkcji* w symulacjach nr: 6, 81, 82 i 83 pokrywają się w całym przedziale czasu, czyli część modelu odpowiedzialna za zaopatrzenie jest w stanie dostosować ilość surowców do zapotrzebowania produkcyjnego, otrzymując w efekcie takie tempo produkcyjne, jakby były one nieograniczone.

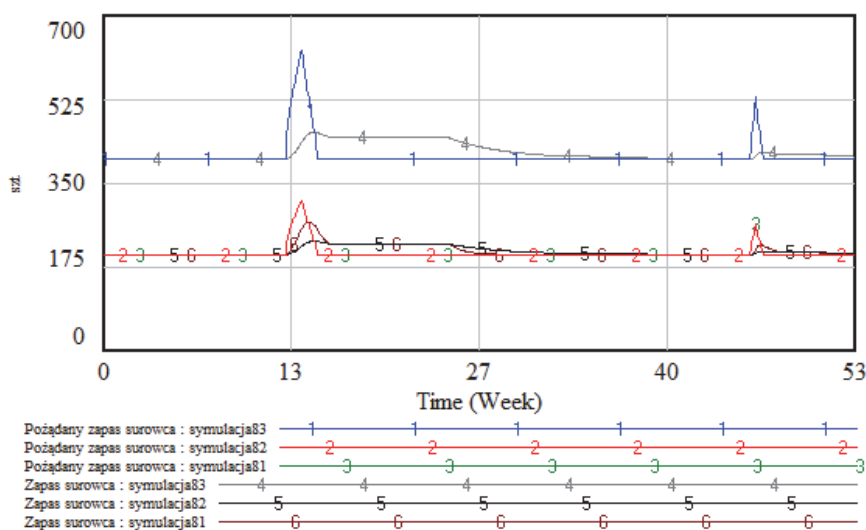
Wartości dla symulacji 74 różnią się, gdyż ograniczenie rozpoczęcia produkcji było tam stałe (200 sztuk na tydzień). Mimo to, przy wszystkich warunkach przedsiębiorstwo wypełniało w danym horyzoncie czasowym zamówienia tak samo. Widać to na przebiegu *Ilości dostarczonych sztuk wyrobu* na rysunku 4.25. Brak wpływu hamującego na tempo produkcji w trzech ostatnich symulacjach jest zauważalny również na rysunku 4.26. Są tam przebiegi *Rozpoczęcia produkcji* oraz jego dwóch parametrów wejściowych: *Produkcji wynikającej z dostępnych surowców* i *Skorygowanego wymaganego rozpoczęcia produkcji*. W przypadku wszystkich tych symulacji, obie zmienne wejściowe mają takie same wartości. Ponieważ żaden inny czynnik nie ma wpływu na strumień *Rozpoczęcia produkcji*, a obie jego wejściowe spośród których wybierane jest minimum są takie same, jest on im równy.



Rys. 4.26. Porównanie przebiegów z różnymi wartościami stałych przy zmiennej *Produkcji wynikającej z dostępnych surowców*
Źródło: opracowanie własne.

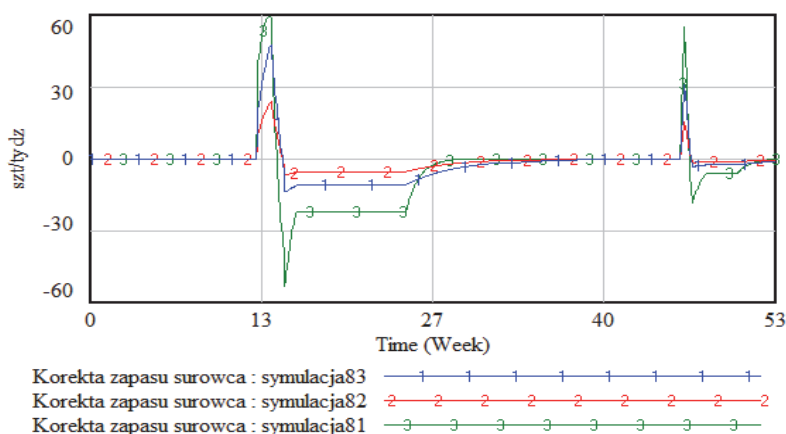
Rysunek 4.27 przedstawia wykresy *Pożądanego zapasu surowca* i *Zapasu surowca* dla symulacji 81-83. Ponieważ w symulacjach 81 i 82 *Zużycie surowca na jednostkę wyrobu* wynosiło 1, a potem zostało podwojone, również zapas minimalny surowca uległ podwojeniu. Przy żadnej z symulacji zapas ten nie został naruszony, zasób surowca w magazynie wynosił zawsze przynajmniej 200 lub 400 sztuk. Czterokrotnie zwiększony *Czas na korektę zapasu surowca* spowodował złagodzenie wzrostu *Zapasu surowca*. W symulacji 81 był on gwałtowniejszy, ponieważ przy krótszym czasie na korektę, system musi szybciej zareagować na potrzebę zwiększenia zaopatrzenia, wymagając większej

dostawy. Gdy czasu jest więcej, można jednorazowo zamówić mniej przedmiotów pracy.

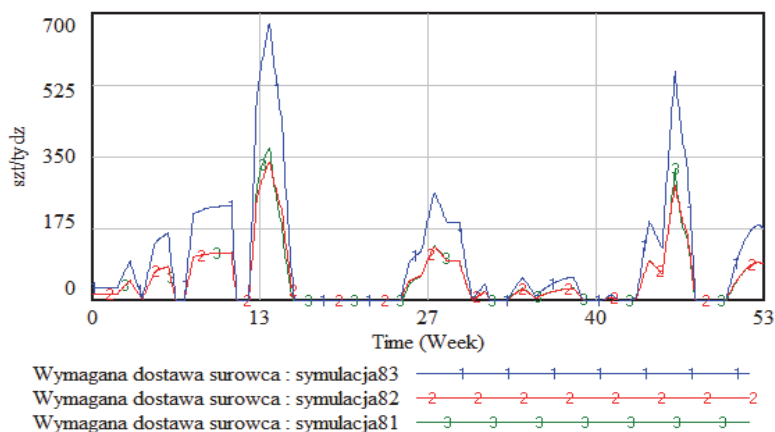


Rys. 4.27. Porównanie przebiegów z różnymi wartościami stałych przy zmiennej
Produkcji wynikającej z dostępnych surowców
Źródło: opracowanie własne.

Rysunek 4.28 prezentuje przebiegi *Korekty zapasu surowca*, gdzie widać zależność parametru *Czas na korektę zapasu surowca*. Jak przy poprzednich wykresach, gdy czas ten był jedyną różnicą pomiędzy symulacjami i jest on krótszy, zmiany są gwałtowniejsze (symulacja 81). Gdy czas na korektę pozostaje bez zmian, a inne jest zużycie surowca na jednostkę wyrobu, im większe zużycie, tym większe wartości korekt. W tym przypadku zużycie było podwojone (zmiana warunków symulacji 82 na warunki symulacji 83), więc wszystkie wartości są dwa razy większe. Rozbieżność w gwałtowności zmian korekty przekłada się na *Wymaganą dostawę surowców*. Ponieważ w tych trzech symulacjach *Skorygowane wymagane rozpoczęcie produkcji*, a więc plany produkcyjne są takie same, a rozbieżność jest w *Zużyciu surowca na jednostkę wyrobu*, to *Wymagane zużycie surowca* jest takie samo dla symulacji 81, 82 i dwukrotnie większe dla symulacji 83. W skutek tego, wartości *Wymaganej dostawy surowca*, będące sumą *Wymaganego zużycia surowca* i *Korekty zapasu surowca*, mają nieznaczące różnice porównując wyniki z symulacji 81 i 82, co przedstawione jest na rysunku 4.29. Rozbieżności wynikają właśnie z różnicy czasów, w których ma się odbywać korekta.

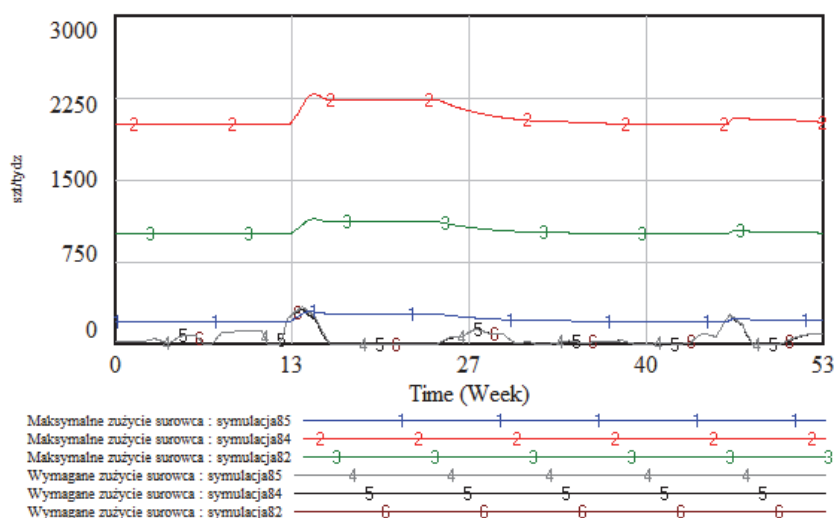


Rys. 4.28. Porównanie przebiegów z różnymi wartościami stałych przy zmiennej
Produkcji wynikającej z dostępnych surowców
Źródło: opracowanie własne.



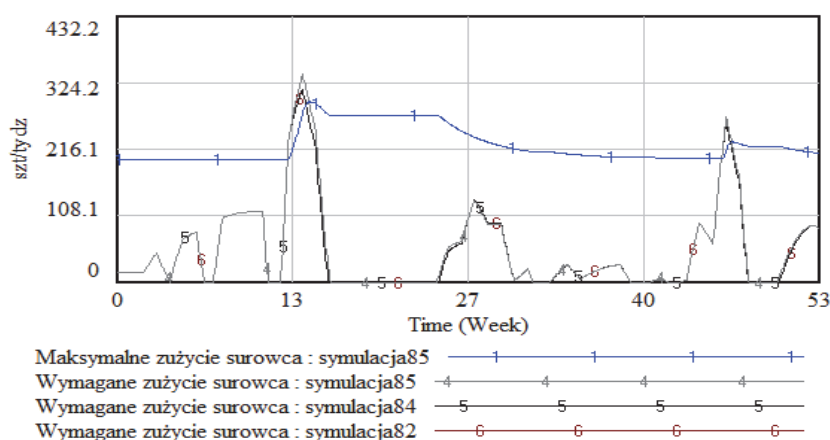
Rys. 4.29. Porównanie przebiegów z różnymi wartościami stałych przy zmiennej
Produkcji wynikającej z dostępnych surowców
Źródło: opracowanie własne.

W kolejnych dwóch symulacjach zmieniono *Czas na wydanie surowca*. W przypadku symulacji 84 założono, że potrzeba czterech godzin, czyli połowy dnia roboczego na wydanie materiałów do produkcji z magazynu (a nie ośmiu, jak było do tej pory). W symulacji 85 wydłużono ten czas aż do całego tygodnia. Uzyskano w ten sposób trzy różne wykresy *Maksymalnego zużycia surowca*, widoczne na rysunku 4.30. Im dłuższy jest czas na wydanie materiału do produkcji, tym mniejsza wartość możliwego zużycia. Na tym samym rysunku znajdują się również zmiany wartości *Wymaganego zużycia surowca*, które w przypadku symulacji 82 i 84 (z krótszymi czasami na wydanie surowca) są znacznie mniejsze niż *Maksymalne zużycie surowca*.

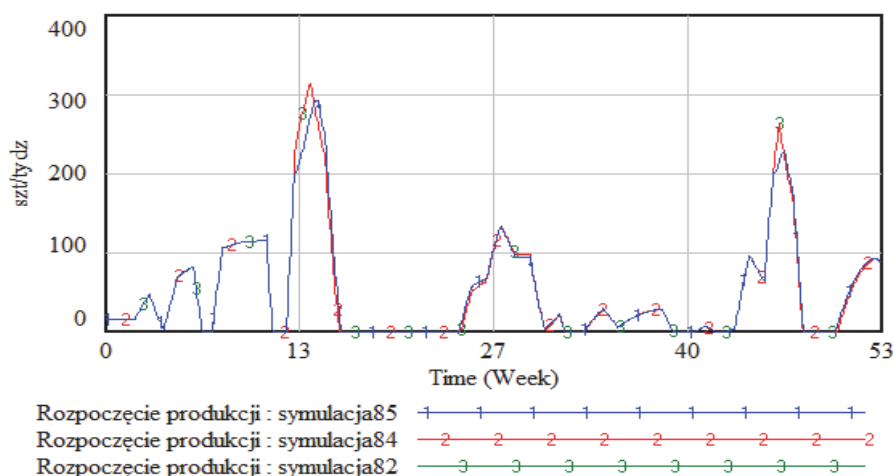


Rys. 4.30. Porównanie przebiegów z różnymi wartościami stałych przy zmiennej
Produkcji wynikającej z dostępnych surowców
 Źródło: opracowanie własne.

Rysunek 4.31 stanowi powiększenie na przebiegi *Wymaganego* i *Maksymalnego* zużycia surowca w symulacji85. Widać, że istnieją przedziały czasowe, w których zużycie wymagane jest większe od maksymalnego. W tych momentach strumień zużycia surowca będzie równy zużyciu maksymalnemu. Wpłynie to na wielkość *Produkcji wynikającej z dostępnych surowców* nie tylko w tych okresach, lecz także w kolejnych, gdzie produkcja ta (w porównaniu z produkcją w dwóch pozostałych symulacjach) może być dalej osłabiona lub zwiększona w celu nadrobienia zaległych zamówień.



Rys. 4.31. Porównanie przebiegów z różnymi wartościami stałych przy zmiennej
Produkcji wynikającej z dostępnych surowców
 Źródło: opracowanie własne.

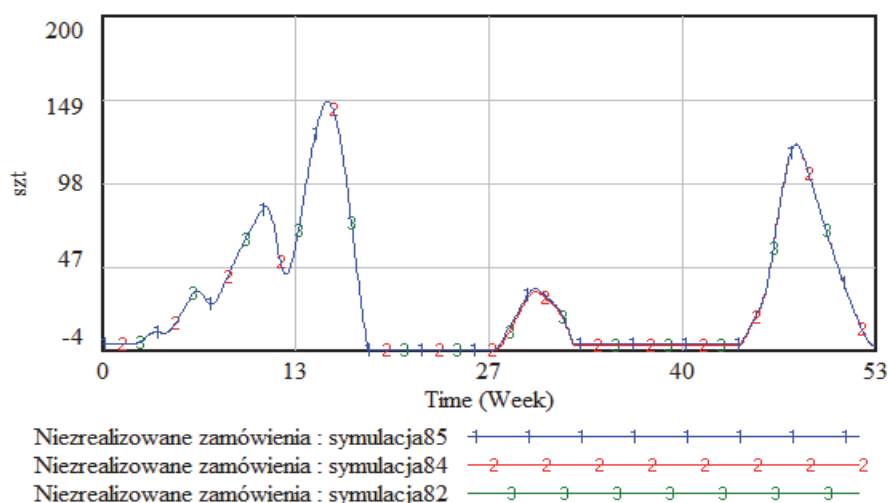


Rys. 4.32. Porównanie przebiegów z różnymi wartościami stałych przy zmiennej
Produkcji wynikającej z dostępnych surowców

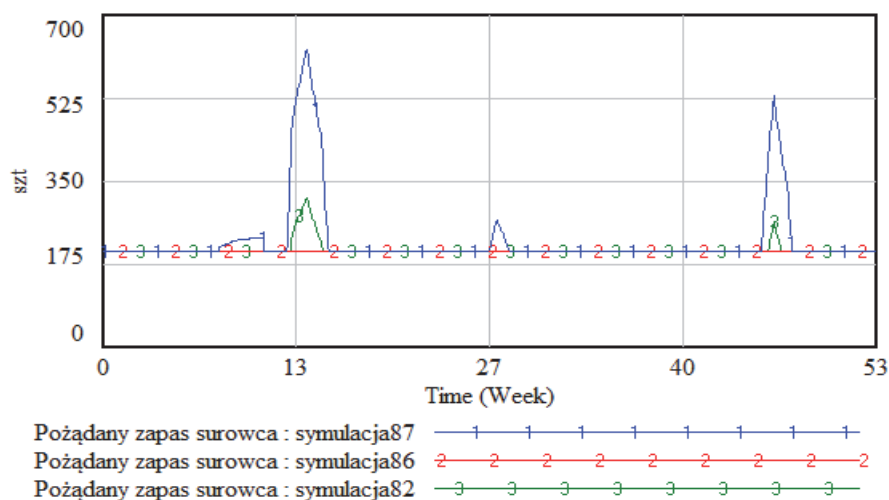
Źródło: opracowanie własne.

Wykresy przebiegów *Rozpoczęcia produkcji* zamieszczono jako rysunek 4.32. Widać tam konsekwencję wprowadzeniu dłuższego czasu wydawania surowca z magazynu, skutkującą mniejszym tempem *Rozpoczęcia produkcji* i zwiększeniem go, gdy pozwala na to ograniczenie nałożone przez *Maksymalne zużycie surowca*. Co ważne okazuje się, że na końcu badanego okresu, produkcja pozwala na wypełnienie wszystkich zamówień. Działo się tak często nawet podczas przedziałów czasu, gdy *Rozpoczęcie produkcji* nie pokrywało się z wymaganą produkcją. Dodatkowo, ilość *Niezrealizowanych zamówień* nie różniła się w sposób znaczący od symulacji 82 i 84, wynosząc maksymalnie dwie sztuki. Przebieg tej zmiennej widoczny jest na rysunku 4.33.

Kolejna zmiana w symulacjach dotyczyła parametru *Czas utrzymania zapasu surowca*. Jest to stała, którą regulujemy długość okresu, przez jaki ma być utrzymany zapas bieżący, wynikający z aktualnych planów produkcyjnych. W symulacji 86 zmniejszono o połowę dotychczasowy czas i wynosi on obecnie 0,5 tygodnia. Symulacja 87 została przeprowadzona z czasem równym dwa tygodnie. Można się spodziewać, że przy dużych wzrostach *Wymaganego zużycia surowca*, wynikającego z dużych wzrostów wymaganej produkcji, wartość *Pożądanego zapasu surowca* będzie większa dla symulacji z dłuższym *Czasem utrzymania zapasu surowca*. Rysunek 4.34 przedstawia właśnie przebiegi *Pożądanego zapasu surowca*.



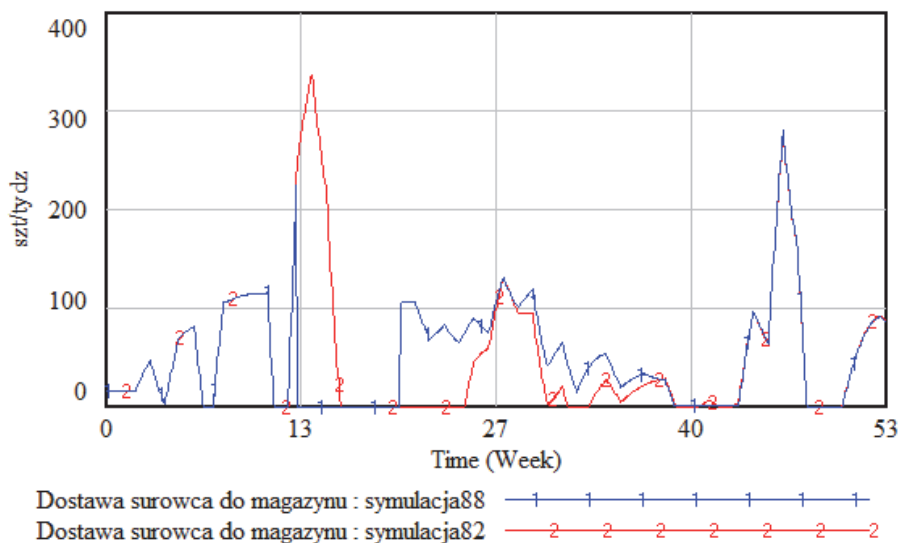
Rys. 4.33. Porównanie przebiegów z różnymi wartościami stałych przy zmiennej
Produkcji wynikającej z dostępnych surowców
Źródło: opracowanie własne.



Rys. 4.34. Porównanie przebiegów z różnymi wartościami stałych przy zmiennej
Produkcji wynikającej z dostępnych surowców
Źródło: opracowanie własne.

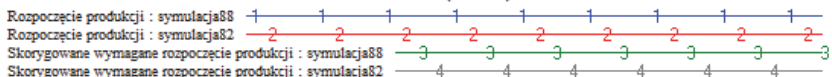
Przy wszystkich trzech symulacjach zapas minimalny ma być taki sam. Jako ostateczną wartość *Pożądanego zapasu surowca* wybiera się wartość maksymalną spośród zapasu bieżącego a minimalnego. Tylko dla wartości z symulacji 82 i 87 zapas bieżący bywa większy niż minimalny, na co ma wpływ wielkość *Czasu utrzymania zapasu surowca*. Zgodnie z przewidywaniami, im większy ten czas, tym większe skoki wartości zapasów. *Pożądaný zapas surowca* dla

i wartości wymaganej produkcji dla obu przebiegów można prześledzić na rysunku 4.37.



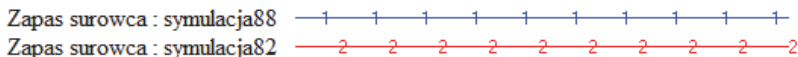
Rys. 4.36. Porównanie przebiegów z różnymi wartościami stałych przy zmiennej
Produkcji wynikającej z dostępnych surowców
Źródło: opracowanie własne.

Rozpoczęcie produkcji ma taki sam przebieg jak *Skorygowane wymagane rozpoczęcie produkcji* w symulacji 82, zaś w symulacji 88 wymagana produkcja rosła dalej, gdy zaprzestano dostarczać surowiec i skończył się zapas pozwalający na dalszą produkcję. Oznacza to, że zapas minimalny był zbyt mały, by utrzymać ciągłość produkcji przy takim popycie. Przebieg zasobów surowca w magazynie jest widoczny na rysunku 4.38. Po upływie ok. jednego tygodnia, czyli wykorzystaniu zapasu (wymagany zapas na bieżącą produkcję był do tego momentu mniejszy niż wartość zapasu minimalnego, więc stale wykorzystywany zapas bieżący nie został zarejestrowany jako *Zapasy surowca*) magazyn był pusty aż do dwudziestego tygodnia. Po tym czasie rozpoczęło się odbudowywanie zapasu minimalnego wraz z wznowieniem produkcji z zapasu bieżącego. Aby ponownie osiągnąć poziom 200 sztuk zapasu w magazynie, układ potrzebował ok. dwudziestu pięciu tygodni. W tym samym czasie, potrzebując na to ok. osiemnastu tygodni, zdążył zrealizować nie tylko aktualnie napływające zamówienia, lecz także zaległe.



Produkcji wynikającej z dostępnych surowców

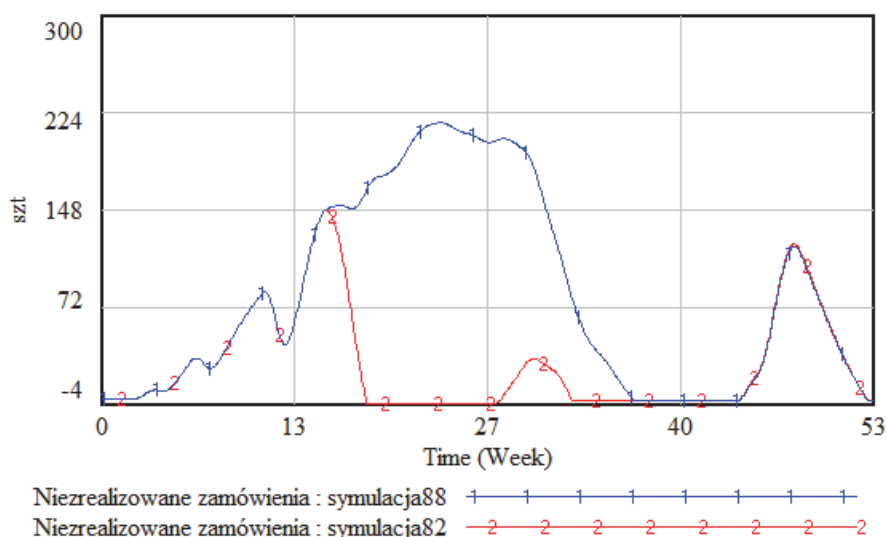
Źródło: opracowanie własne.



Produkcji wynikającej z dostępnych surowców

Źródło: opracowanie własne.

czasu.



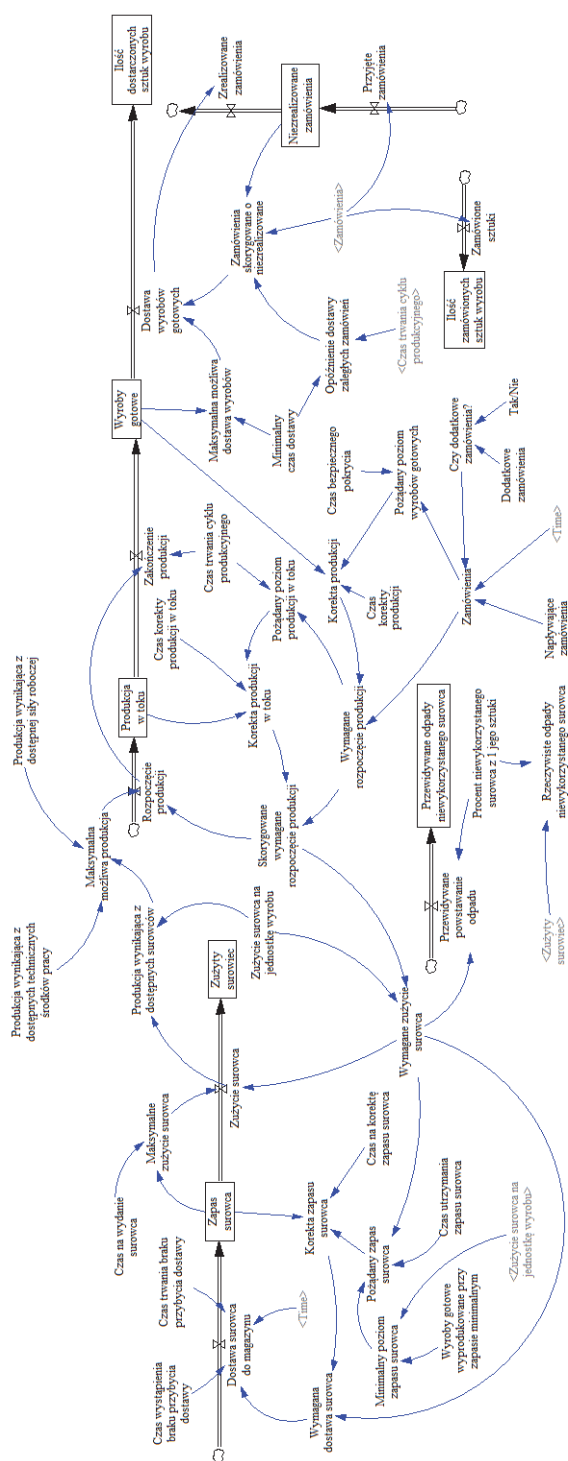
Rys. 4.39. Porównanie przebiegów z różnymi wartościami stałych przy zmiennej
Produkcji wynikającej z dostępnych surowców

Źródło: opracowanie własne.

Symulacje przedstawione w tym rozdziale przybliżyły działanie modelu w dotychczasowej formie oraz wpływ wartości poszczególnych stałych na jego funkcjonowanie. Ponieważ model działa w sposób oczekiwany, w dalszej części pracy zostaną dodane parametry odpowiadające za ograniczanie produkcji wynikające z dostępnych technicznych środków pracy i dostępnej siły roboczej. Zostanie rozpatrzona także część pozwalająca oszacować część odpadów powstałych z niewykorzystanego surowca.

4.4. Model zaopatrzenie – produkcja – zbył

Po wprowadzeniu szeregu zmian w modelu omówionym w rozdziale 4.1, uzyskano ostateczną formę modelu, którą przedstawiono na rysunku 4.40. Jest to model omawiany w rozdziale 0, wzbogacony o dwa parametry ograniczające możliwą wielkość tempa rozpoczęcia produkcji (rysunek 4.41) oraz część pozwalającą na obliczanie przewidywanej i rzeczywistej ilości odpadów niewykorzystanego surowca (rysunek 4.42). Model ten zostanie użyty do symulacji przepływu materiału w przedsiębiorstwie, poczynając od przyjęcia zamówienia do wysyłki gotowego wyrobu. W tabeli 4.9 znajduje się zestawienie wszystkich zmiennych i stałych w nim występujących oraz ich ostatecznych definicji. Podkreśleniem wyróżniono te parametry, których definicje zostały zmienione lub wprowadzone, porównując model ostateczny z modelem z rozdziału 4.3.2.



Rys. 4.40. Model zaopatrzenia – produkcja – zbyty

Źródło: opracowanie własne.

Tabela 4.9. Zmienne i stałe w modelu zaopatrzenie – produkcja – zbył

Nazwa zmiennej/stalej	Równanie	Jednostka
<u>Rozpoczęcie produkcji</u>	MIN (Maksymalna możliwa produkcja, <u>Skorygowane wymagane rozpoczęcie produkcji</u>)	[szt./tydz.]
Produkcja w toku	INTEG (Rozpoczęcie produkcji – Zakończenie produkcji) Wartość początkowa: Pożądany poziom produkcji w toku	[szt.]
Zakończenie produkcji	DELAY3 (Rozpoczęcie produkcji, Czas trwania cyklu produkcyjnego)	[szt./tydz.]
Wyroby gotowe	INTEG (Zakończenie produkcji – Dostawa wyrobów gotowych) Wartość początkowa: Pożądany poziom wyrobów gotowych	[szt.]
Dostawa wyrobów gotowych	MIN (Maksymalna możliwa dostawa wyrobów, Zamówienia skorygowane o niezrealizowane)	[szt./tydz.]
Ilość dostarczonych sztuk wyrobu	INTEG (Dostawa wyrobów gotowych) Wartość początkowa: 0	[szt.]
<u>Maksymalna możliwa produkcja</u>	MIN (Produkcja wynikająca z dostępnej siły roboczej, MIN (Produkcja wynikająca z dostępnych surowców, Produkcja wynikająca z dostępnych technicznych środków pracy))	[szt./tydz.]
<u>Produkcja wynikająca z dostępnych technicznych środków pracy</u>	<u>Zależnie od przedsiębiorstwa</u> <u>Zastosowano: 200</u>	[szt./tydz.]
<u>Produkcja wynikająca z dostępnej siły roboczej</u>	<u>Zależnie od przedsiębiorstwa</u> <u>Zastosowano: 150, 200</u>	[szt./tydz.]
Skorygowane wymagane rozpoczęcie produkcji	MAX (0, Korekta produkcji w toku + Wymagane rozpoczęcie produkcji)	[szt./tydz.]
Korekta produkcji w toku	(Pożądany poziom produkcji w toku – Produkcja w toku)/ Czas korekty produkcji w toku	[szt./tydz.]
Czas korekty produkcji w toku	Stała zależna od przedsiębiorstwa Zastosowano: 2	[tydz.]
Pożądany poziom produkcji w toku	Wymagane rozpoczęcie produkcji * Czas trwania cyklu produkcyjnego	[szt.]
Czas trwania cyklu produkcyjnego	Stała zależna od przedsiębiorstwa Zastosowano: 2	[tydz.]
Wymagane rozpoczęcie produkcji	MAX(Korekta produkcji + Zamówienia, 0)	[szt./tydz.]
Korekta produkcji	(Pożądany poziom wyrobów gotowych – Wyroby gotowe) / Czas korekty produkcji	[szt./tydz.]
Czas korekty produkcji	Stała zależna od przedsiębiorstwa Zastosowano: 2	[tydz.]
Pożądany poziom wyrobów gotowych	Zamówienia * Czas bezpiecznego pokrycia	[szt.]
Czas bezpiecznego pokrycia	Stała zależna od przedsiębiorstwa Zastosowano: 2	[tydz.]

Nazwa zmiennej/stalej	Równanie	Jednostka
Zamówienia	Napływające zamówienia(Time) + „Czy dodatkowe zamówienia?”	[szt./tydz.]
Napływające zamówienia	[(0,0)-(53,150)], (0,10), (1,10), (2,10), (3,20), (4,10), (5,30), (6,40), (7,10), (8,50), (9,60), (10,70), (11,80), (12,10), (13,110), (14,150), (15,150), (16,100), (17,50), (18,50), (19,10), (20,10), (21,20), (22,20), (23,30), (24,30), (25,40), (26,40), (27,60), (28,60), (29,70), (30,50), (31,50), (32,30), (33,30), (34,30), (35,20), (36,20), (37,20), (38,20), (39,10), (40,10), (41,10), (42,5), (43,5), (44,30), (45,30), (46,100), (47,100), (48,50), (49,50), (50,50), (51,50), (52,50), (53,50)	[szt./tydz.]
Czy dodatkowe zamówienia?	IF THEN ELSE(„Tak/Nie” = 1, Dodatkowe zamówienia, „Tak/Nie”)	[szt./tydz.]
Dodatkowe zamówienia	Zależnie od przedsiębiorstwa Zastosowano: 5	[szt./tydz.]
Tak/Nie	1 (gdy tak) lub 0 (gdy nie) Zastosowano: 1	–
Maksymalna możliwa dostawa wyrobów	Wyroby gotowe / Minimalny czas dostawy	[szt./tydz.]
Minimalny czas dostawy	Stała zależna od przedsiębiorstwa Zastosowano: 1	[tydz.]
Opóźnienie dostawy zaległych zamówień	Czas trwania cyklu produkcyjnego + Minimalny czas dostawy	[tydz.]
Zamówienia skorygowane o niezrealizowane	IF THEN ELSE (Niezrealizowane zamówienia >= 0, DELAY1 ((Niezrealizowane zamówienia / Opóźnienie dostawy zaległych zamówień) + Zamówienia, Opóźnienie dostawy zaległych zamówień), Zamówienia)	[szt./tydz.]
Zamówione sztuki	Zamówienia	[szt./tydz.]
Ilość zamówionych sztuk wyrobu	INTEG (Zamówione sztuki) Wartość początkowa: 0	[szt.]
Zrealizowane zamówienia	Dostawa wyrobów gotowych	[szt./tydz.]
Niezrealizowane zamówienia	INTEG(Przyjęte zamówienia – Zrealizowane zamówienia) Wartość początkowa: 0	[szt.]
Przyjęte zamówienia	Zamówienia	[szt./tydz.]
Produkcja wynikająca z dostępnych surowców	Zużycie surowca / Zużycie surowca na jednostkę wyrobu	[szt./tydz.]
Zużycie surowca na jednostkę wyrobu	Zależnie od przedsiębiorstwa Zastosowano: 1	[szt./szt.]
Wymagane zużycie surowca	Skorygowane wymagane rozpoczęcie produkcji * Zużycie surowca na jednostkę wyrobu	[szt./tydz.]
Wymagana dostawa surowca	MAX (0, Wymagane zużycie surowca + Korekta zapasu surowca)	[szt./tydz.]

Nazwa zmiennej/stalej	Równanie	Jednostka
Dostawa surowca do magazynu	IF THEN ELSE (Czas trwania braku przybycia dostawy > 0, IF THEN ELSE (Czas wystąpienia braku przybycia dostawy <= Time :AND: Time < (Czas trwania braku przybycia dostawy + Czas wystąpienia braku przybycia dostawy), 0, Wymagana dostawa surowca), Wymagana dostawa surowca)	[szt./tydz.]
Czas wystąpienia braku przybycia dostawy	Zależnie od przedsiębiorstwa Zastosowano: 0, 13	[tydz.]
Czas trwania braku przybycia dostawy	Zależnie od przedsiębiorstwa Zastosowano: 0, 7	[tydz.]
Zapas surowca	INTEG (Dostawa surowca do magazynu – Zużycie surowca) Wartość początkowa: Pożądany zapas surowca	[szt.]
Zużycie surowca	MIN (Maksymalne zużycie surowca, Wymagane zużycie surowca)	[szt./tydz.]
Maksymalne zużycie surowca	Zapas surowca / Czas na wydanie surowca	[szt./tydz.]
Czas na wydanie surowca	Zależnie od przedsiębiorstwa Zastosowano: 0,2, 1	[tydz.]
<u>Zużyty surowiec</u>	<u>INTEG (Zużycie surowca)</u> <u>Wartość początkowa: 0</u>	[szt.]
Korekta zapasu surowca	(Pożądany zapas surowca – Zapas surowca)/ Czas na korektę zapasu surowca	[szt./tydz.]
Czas na korektę zapasu surowca	Zależnie od przedsiębiorstwa Zastosowano: 4	[tydz.]
Pożądany zapas surowca	MAX (Minimalny poziom zapasu surowca, Wymagane zużycie surowca * Czas utrzymania zapasu surowca)	[szt.]
Czas utrzymania zapasu surowca	Zależnie od przedsiębiorstwa Zastosowano: 1	[tydz.]
Minimalny poziom zapasu surowca	Zużycie surowca na jednostkę wyrobu * Wyroby gotowe wyprodukowane przy zapasie minimalnym	[szt.]
Wyroby gotowe wyprodukowane przy zapasie minimalnym	Zależnie od przedsiębiorstwa Zastosowano: 200	[szt.]
<u>Przewidywane powstawanie odpadu</u>	<u>Procent niewykorzystanego surowca</u> <u>z jednej jego sztuki * Wymagane zużycie surowca</u>	[szt./tydz.]
<u>Przewidywane odpady niewykorzystanego surowca</u>	<u>INTEG (Przewidywane powstawanie odpadu)</u> <u>Wartość początkowa: 0</u>	[szt.]
<u>Procent niewykorzystanego surowca z jednej jego sztuki</u>	<u>Zależnie od przedsiębiorstwa</u> <u>Zastosowano: 0, 0,2</u>	–
<u>Rzeczywiste odpady niewykorzystanego surowca</u>	<u>Procent niewykorzystanego surowca</u> <u>z jednej jego sztuki * Zużyty surowiec</u>	[szt.]

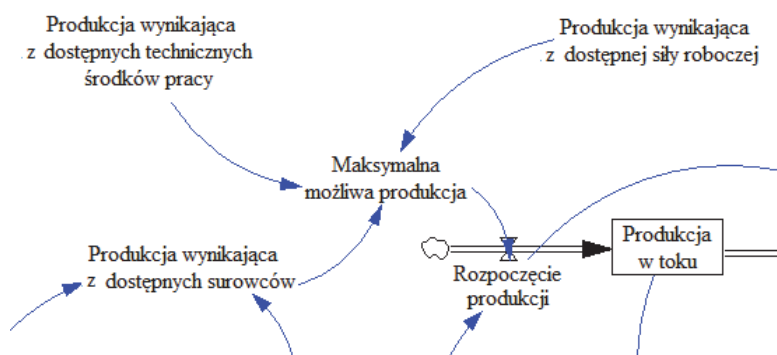
Źródło: opracowanie własne.

Ponieważ jest to model ostateczny, oczekiwane jest, by spełniał wymagania stawiane poprzedniemu modelowi oraz uwzględniał hamujący wpływ ograniczeń na *Rozpoczęcie produkcji* i wyliczał przewidywaną oraz rzeczywistą (wg działania modelu) ilość odpadów powstałą jako niewykorzystany surowiec.

Niezależnie od tego, czy większe ograniczenie będzie wynikać z stałej wprowadzonej jako *Produkcja wynikająca z dostępnych technicznych środków pracy* lub *dostępnej siły roboczej*, czy zmiennej *Produkcji wynikającej z dostępnych surowców*, układ powinien wybierać najmniejszą wartość i rozpocząć produkcję w tempie wymaganym, ale nie większym od wybranej wartości ograniczenia. Na zmiany parametrów omówionych przy poprzednim modelu, powinien reagować w ten sam sposób, uwzględniając ograniczenie *Rozpoczęcia produkcji*.

Podczas wyliczania powstałych odpadów, przebiegi zużywanego surowca oraz powstałego odpadu powinny narastać. Ilość odpadów powinna być proporcjonalna do ilości zużywanego (realnie lub planowo) surowca, zgodnie z ustalonym procentem, z jakim powstaje z jednostki surowca. Jeśli ilość *Zużytego surowca* jest mniejsza od *Wymaganego zużycia surowca* (co może wynikać np. z długiego czasu wydawania surowca z magazynu), ilość *Rzeczywistych odpadów niewykorzystanego surowca* powinna być odpowiednio mniejsza od ilości *Przewidywanych odpadów niewykorzystanego surowca*.

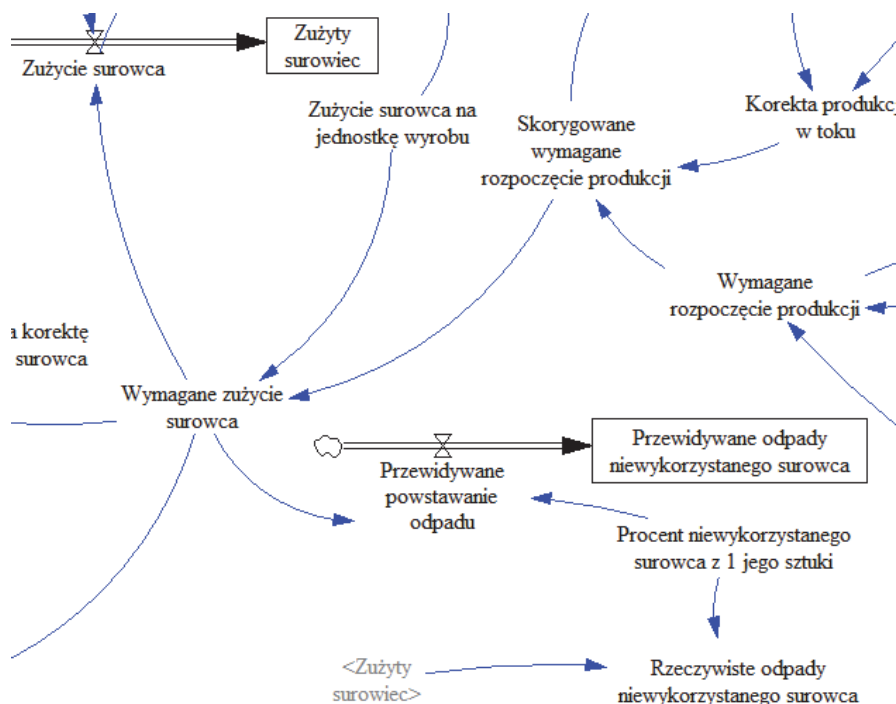
Jak w poprzednich modelach, tempo z jakim należy rozpocząć produkcję jest wyznaczane przez *Skorygowane wymagane rozpoczęcie produkcji*. Ogranicza je *Maksymalna możliwa produkcja*, która jest określana jako minimum spośród trzech wartości: *Produkcji wynikającej z dostępnych surowców*, *Produkcji wynikającej z dostępnych technicznych środków pracy* oraz *Produkcji wynikającej z dostępnej siły roboczej*. Możliwe tempo wybierane jest w zmiennej *Rozpoczęcie produkcji*, której definicję zmieniono. *Produkcja wynikająca z dostępnych surowców* została omówiona wcześniej (rozdział 0) i jest ona wartością zmienną.



Rys. 4.41. Ograniczenia wielkości produkcji

Źródło: opracowanie własne.

Produkcja wynikająca z dostępnej siły roboczej i Produkcja wynikająca z dostępnych technicznych środków pracy to wartości stałe, wprowadzone przez użytkownika. Mówią one, ile sztuk tygodniowo jest możliwych do wykonania przy obecnym stanie posiadania i zatrudnienia. Nie uwzględniane są wydajności maszyn i narzędzi zmieniające się wskutek m.in. awarii, napraw i przeglądów. Mówiąc o sile roboczej, nie bierzemy pod uwagę nieobecności pracowników, zatrudniania nowych. Zakładamy, że wszyscy posiadają odpowiednie kwalifikacje oraz nie wymagają doszkalania.



Rys. 4.42. Obliczanie przewidywanych i faktycznie powstałych ilości odpadów niewykorzystanego surowca

Źródło: opracowanie własne.

Podczas planowania ilości potrzebnych dostaw, brane są pod uwagę plany produkcyjne oraz ilość potrzebnych do wyprodukowania przedmiotów pracy (zwanych tutaj „surowcem”). Pierwsza z tych wielkości w tym modelu to *Skorygowane wymagane rozpoczęcie produkcji*, natomiast druga jest *Zużycie surowca na jednostkę wyrobu*. Jak zostało przedstawione w omówieniu modelu zaopatrzenia, zużycie to można traktować jako dokładną ilość potrzebnego surowca

przypadającą na dokładnie jedną sztukę wyrobu, gdy mówimy o montażu (zakładając, że podczas montowania żadna z części nie ulegnie zniszczeniu). W przypadku produkcji, gdzie surowiec poddawany jest dalszej obróbce lub przetwarzaniu, mówimy o technicznej normie zużycia, czyli ilości wymaganej do wytworzenia jednej sztuki wyrobu wraz z wytworzeniem pewnych odpadów uzasadnionych (np. opiłki, reszta materiału pozostała po wykrojeniu potrzebnej ilości z całego surowca). Aby ustalić, ile surowca pozostaje niewykorzystanego, użytkownik musi podać jaki procent (zapisany jako ułamek dziesiętny) materiału z jednej sztuki (jednostki) surowca jest odpadem. W przypadku montażu, jako wartość stałej *Procent niewykorzystanego surowca z 1 jego sztuki* należy podać zero.

Przewidywane powstawanie odpadu to zmienna przepływowa wyliczająca ilość *Przewidywanych odpadów niewykorzystanego surowca* w czasie trwania całej symulacji. Jest to pomnożone *Wymagane zużycie surowca* potrzebne do spełnienia planu produkcyjnego, przez ilość powstających odpadów przypadających na jednostkę surowca. Poziom tych odpadów kumuluje się, a jego wartość przedstawia zmienna *Przewidywane odpady niewykorzystanego surowca*. To, ile faktycznie zostało zużytego surowca, nie jest jednak tożsame z jego wymaganym zużyciem, ponieważ ograniczane jest przez *Maksymalne zużycie surowca* (zależne od zasobów surowca w magazynie i czasu potrzebnego na jego wydanie). Aby obliczyć, ile rzeczywiście powstało odpadów, należało wprowadzić poziom *Zużytego surowca*. Zmienna ta kumuluje ilość surowca zużywanego w tempie nadawanym przez *Zużycie surowca* podczas całej symulacji. Wiedząc, ile surowca zostało faktycznie spożytkowanego i mnożąc tę ilość przez *Procent niewykorzystanego surowca z jednej jego sztuki*, obliczana jest ilość *Rzeczywistych odpadów niewykorzystanego surowca*.

Obliczanie wielkości odpadów można wykorzystać jako wstęp do gospodarki odpadami. Kiedy określimy, czy odpady te są uchwytnie (a dalej użyteczne i nieużyteczne), czy nieuchwytnie lub zwrotne, można wprowadzić symulację dalszego postępowania z nimi. W przypadku odpadów zwrotnych, czyli takich, które można uznać ponownie za surowiec bez konieczności poddawania ich dodatkowym operacjom w konkretnym procesie produkcyjnym, nie powinno się ich rozumieć jako części technicznej normy zużycia. Przy rozbudowie modelu, który miałby uwzględniać gospodarkę odpadami i wykorzystanie odpadów zwrotnych, należałoby dodać korektę do *Wymaganej dostawy surowca*. Korekta ta powinna mieć postać sprzężenia zwrotnego, które odejmowałoby aktualną ilość uzyskanych odpadów zwrotnych od ilości surowca, który należy zamówić.

Z wykorzystaniem tego modelu przeprowadzono pięć symulacji różniących się wartościami stałych, w sposób przedstawiony w tabeli 4.10.

Tabela 4.10. Wartości stałych w symulacjach w zmodyfikowanym modelu z ograniczeniem produkcji przez ilość dostępnych surowców

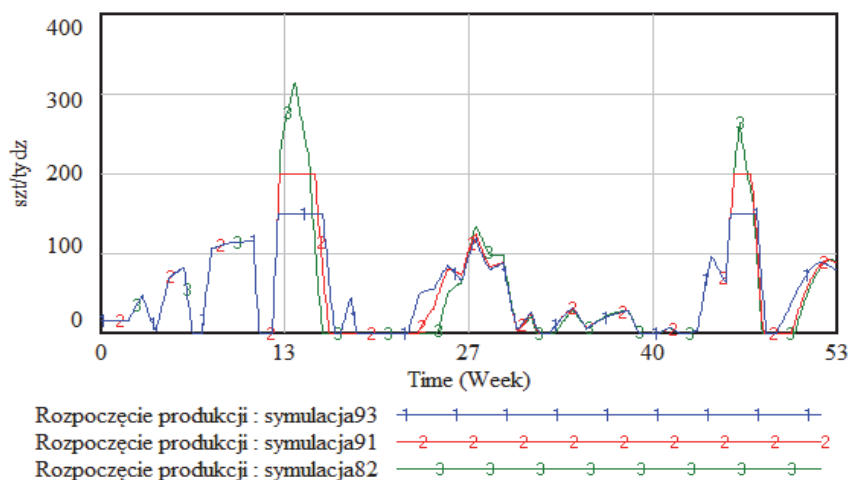
Nazwa symulacji	Nazwa stałej					
	Czas na wydanie surowca	Czas wystąpienia braku przybycia dostawy	Czas trwania braku przybycia dostawy	Produkcja wynikająca z dostępnych technicznych środków pracy	Produkcja wynikająca z dostępnej siły roboczej	Procent niewykorzystanego surowca z jednej jego sztuki
symulacja 91	0,2	0	0	200	200	0
symulacja 92	0,2	13	7	200	200	0
symulacja 93	0,2	0	0	200	150	0
symulacja 94	0,2	13	7	200	150	0
symulacja 95	1	0	0	200	200	0,2

Źródło: opracowanie własne.

Wartości innych stałych parametrów są takie same, jak wprowadzone podczas symulacji 82. Podobnie jak w poprzednim rozdziale, przy porównaniach symulacji w tej części pracy zostaną wykorzystane symulacje po zmianach dotyczących jednego parametru (lub pary, gdy będziemy rozpatrywać przypadki bez dostaw w pewnym przedziale czasu i przypadek odpadów niewykorzystanego surowca). Można przyjąć, że symulacja 91 będzie stałym, choć nie jedynym punktem odniesienia dla kolejnych symulacji (jaką to funkcję pełniła symulacja 82).

Pierwsze porównane zostaną symulacje 82, 91 oraz 93. Symulację 82 omówiono w rozdziale 0. W symulacji 91 dodano stałe ograniczenia *Produkcji wynikającej z dostępnych technicznych środków pracy* i *Produkcji wynikającej z dostępnej siły roboczej*, gdy oba parametry pozwalają na *Rozpoczęcie produkcji* z tempem nie większym niż 200 sztuk na tydzień. Jest to taka sama wartość, jak stałego ograniczenia *Produkcji wynikającej z dostępnych surowców* dobrego jako najkorzystniejsze. Symulacje 93 i 91 różnią się wartością *Produkcji wynikającej z dostępnej siły roboczej*, którą zmniejszono do 150 sztuk na tydzień. Zmniejszenie jednego z ograniczeń skutkuje ustaleniem produkcji na najniższej z możliwych prędkości produkcji. W przypadku symulacji 82 jedyne występujące ograniczenie produkcji jest zmienne i wynika z dostępności przedmiotów pracy. W symulacji 91 maksymalne tempo produkcji wynosi 200 sztuk na tydzień, nawet gdy zmieniająca się w czasie wartość maksymalnej produkcji wynikającej

z dostępności surowców jest większa. Analogicznie, w symulacji 93 stałe ograniczenie pozwala na rozpoczęcie produkcji 150 sztuk na tydzień, chyba że wartość *Produkcji* wynikającej z *dostępnych surowców* jest mniejsza. Zgadza się to z przebiegami *Rozpoczęcia produkcji* na rysunku 4.43. Przy silniej ograniczanej produkcji, układ rozpoczyna (lub zwiększa) ją w okresach, w których nie była wymagana (lub nie takim tempie). Po pewnym czasie wykresy symulacji 91, 93 ponownie pokrywają się z wartościami dla symulacji 82.



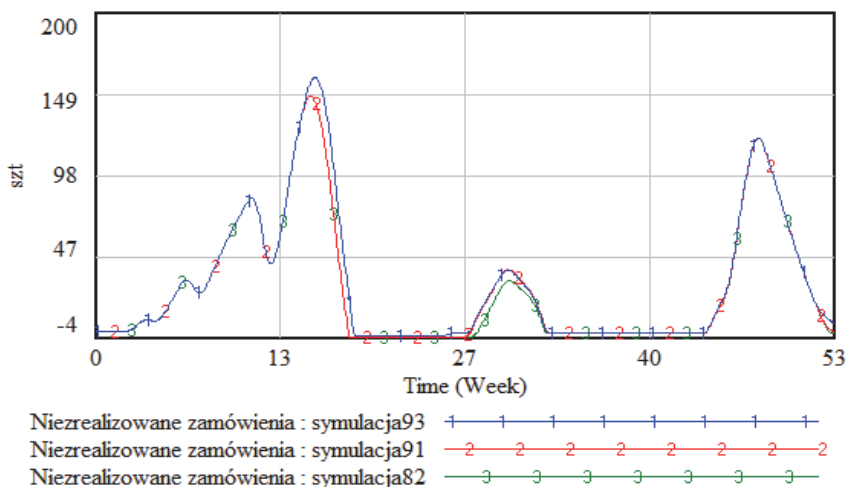
Rys. 4.43. Porównanie przebiegów modelu zaopatrzenie – produkcja – zbył z różnymi wartościami ograniczeń *Rozpoczęcia produkcji*

Źródło: opracowanie własne.

Układ dąży do tempa nadawanego przy występowaniu tylko zmiennego ograniczenia wynikającego z zaopatrzenia w przedmioty pracy. Przy nim jest w stanie zminimalizować ilość *Niezrealizowanych zamówień*. Na rysunku 4.44 przedstawiono przebiegi tej zmiennej. Widać, że im większa była możliwa produkcja, tym więcej zamówień dostarczono. Po upływie pięćdziesiątego trzeciego tygodnia zauważono brak realizacji zamówień (pięciu sztuk) jedynie w przypadku symulacji 93. Ograniczenie *Rozpoczęcia produkcji* do 150 sztuk na tydzień było zbyt silnym ograniczeniem, by wypełnić wszystkie zamówienia w danym horyzoncie czasowym.

Za pomocą kolejnych symulacji zbadano wpływ braku dostaw surowca, gdy nałożone są stałe ograniczenia na produkcję do 200 sztuk na tydzień. Symulacja 92 różni się od symulacji 91 brakiem dostaw między trzynastym a dwudziestym tygodniem – w takim samym przedziale czasu, jak w symulacji 88. Porównano

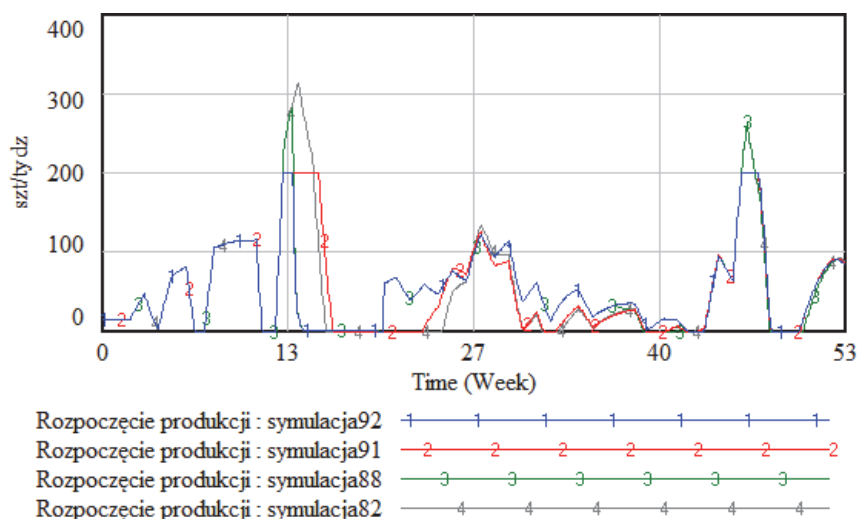
symulacje 82, 88, 91 i 92. Różnice pomiędzy przebiegami *Rozpoczęcia produkcji* przedstawiono na rysunku 4.45. Symulacje 91, 92 posiadają ograniczenia tempa produkcji na poziomie 200 sztuk na tydzień, których nie ma w symulacjach 82, 88. Symulacje 88 i 91 posiadają ciągle dostawy, zaś w przypadku symulacji 88, 92 surowiec nie jest dostarczany między trzynastym i dwudziestym tygodniem, co skutkuje ich takim samym tempem spadku *Rozpoczęcia produkcji* po wykorzystaniu zapasów.



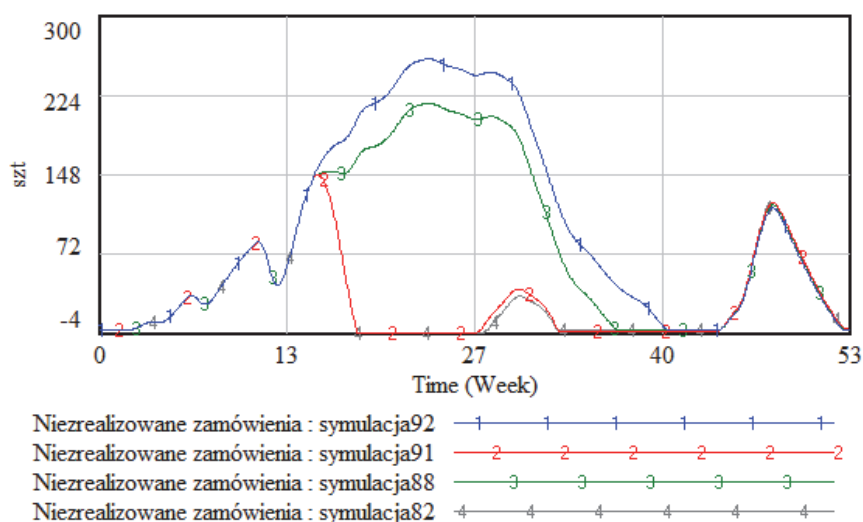
Rys. 4.44. Porównanie przebiegów modelu zaopatrzenie – produkcja – zbyty z różnymi wartościami ograniczeń *Rozpoczęcia produkcji*

Źródło: opracowanie własne.

Po wznowieniu dostaw wykresy dla obu tych symulacji pokrywają się, aż do trzydziestego szóstego tygodnia, po którym na czas pięciu tygodni produkcja jest większa dla symulacji 92. Wynika to z uregulowania zaległych zamówień w symulacji 88, podczas gdy w symulacji z ograniczeniem produkcji jeszcze wszystkich nie zrealizowano. Po wypełnieniu zamówień, *Rozpoczęcie produkcji* ma zbliżone wartości dla wszystkich symulacji, aż do momentu napotkania ograniczenia dla symulacji 91, 92. Od tego momentu przebiegi tej zmiennej dla obu symulacji mają niewiele większe wartości (ok. jedna sztuka na tydzień), aby wyprodukować tą samą ilość wyrobu i wypełnić wszystkie zamówienia. Można także zauważyć, że dla symulacji 91 po pierwszym wystąpieniu działania ograniczenia tempa produkcji, *Rozpoczęcie produkcji* również miało większe wartości, aż ponownie wyrównało się z wartościami dla symulacji 82 po nadrobieniu zaległych zamówień.



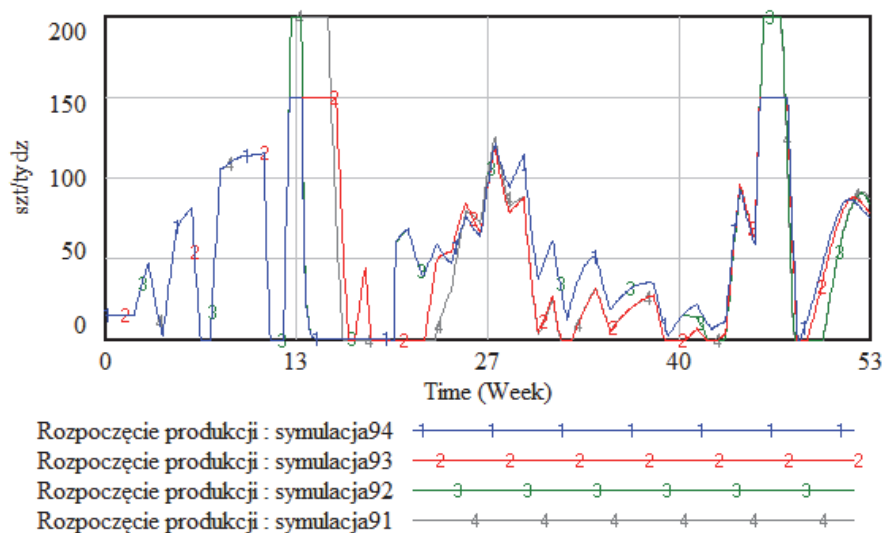
Rys. 4.45. Porównanie przebiegów modelu zaopatrzenie – produkcja – zbył z różnymi wartościami ograniczeń *Rozpoczęcia produkcji*
Źródło: opracowanie własne.



Rys. 4.46. Porównanie przebiegów modelu zaopatrzenie – produkcja – zbył z różnymi wartościami ograniczeń *Rozpoczęcia produkcji*
Źródło: opracowanie własne.

Na rysunku 4.46 przedstawiono wykresy *Niezrealizowanych zamówień*, gdzie widać różnice między symulacjami wynikające z wystąpienia braku dostaw (w parze symulacji 82 i 88 oraz 91 i 92), a także z powodu wprowadzenia ograniczenia na tempo *Rozpoczęcia produkcji* (w parze symulacji 82, 91 oraz 88, 92). Ten sam mechanizm zwiększania wartości *Rozpoczęcia produkcji* aż do

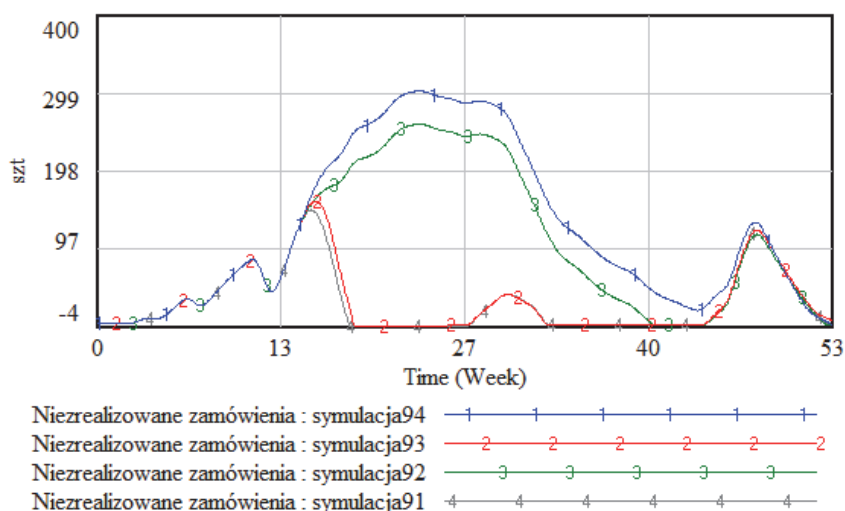
nadrobienia zamówień, a następnie wyrównania wartości z przebiegami o mniejszym ograniczeniu można zauważyć w porównaniu symulacji 91-94. Symulacja 94 powstała jako symulacja 93 z brakiem dostaw, ponownie między trzynastym a dwudziestym tygodniem. Tym razem ograniczenie tempa produkcji wynosi 150 sztuk na tydzień. Relacje między tymi symulacjami można porównać do poprzednich, gdy symulacja 91 zajmuje miejsce 82, symulacja 92-88, 93-91, zaś 94-92 (każda z pierwszych symulacji w parze ma silniejsze ograniczenia produkcji w porównaniu z drugą).



Rys. 4.47. Porównanie przebiegów modelu zaopatrzenie – produkcja – zbyty z różnymi wartościami ograniczeń *Rozpoczęcia produkcji*

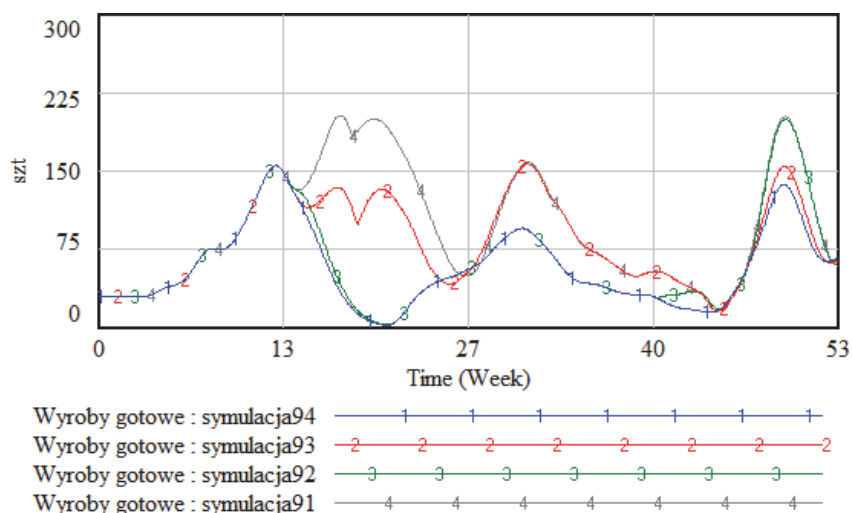
Źródło: opracowanie własne.

Przebiegi *Rozpoczęcia produkcji* i *Niezrealizowanych zamówień* prezentują rysunki 4.47, 4.48. W przypadku symulacji 93, 94 ograniczenie produkcji było na tyle duże, że po pięćdziesiątym trzecim tygodniu nie wypełniono wszystkich zamówień (nie dostarczono pięciu sztuk wyrobu) w symulacji 93. Była to symulacja z zapewnioną ciągłością dostaw, dla której spodziewano się efektu lepszego niż dla symulacji 94, gdy wystąpił brak dostaw surowca. Prawdopodobnie związane jest to z wcześniejszym wyhamowaniem zapotrzebowania produkcji do zera. Ponieważ zapasy wyrobów gotowych dla symulacji 93 były wtedy większe niż dla symulacji 94 (rysunek 4.49), produkcja została uruchomiona później, co z kolejnymi wahaniami pożądanego jej tempa (spowodowanymi ustaleniem wartości nowych zamówień) skutkowało niewypełnieniem zamówień w czasie trwania rozważanego przedziału czasowego.



Rys. 4.48. Porównanie przebiegów modelu zaopatrzenie – produkcja – zbyty z różnymi wartościami ograniczeń *Rozpoczęcia produkcji*

Źródło: opracowanie własne.

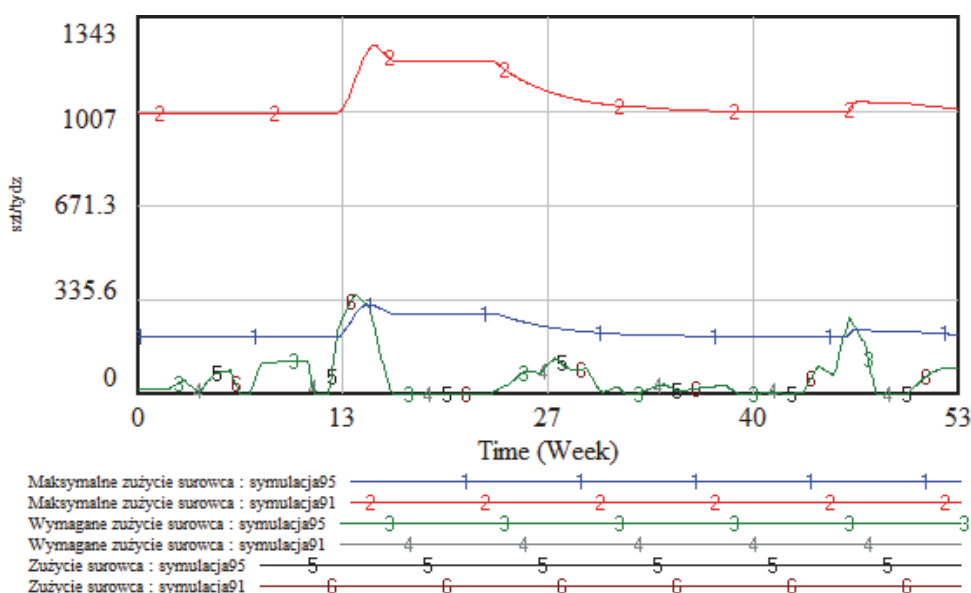


Rys. 4.49. Porównanie przebiegów modelu zaopatrzenie – produkcja – zbyty z różnymi wartościami ograniczeń *Rozpoczęcia produkcji*

Źródło: opracowanie własne.

Ostatnie z rozważanych porównań dotyczy odpadu powstającego z surowca. W symulacji 95 zmieniono dwie stałe. Zwiększono z 0% do 20% *Procent niewykorzystanego surowca z jednej jego sztuki*. Oznacza to, że na jedną zamawianą sztukę lub jednostkę materiału potrzebnego do produkcji, wykorzystujemy z niego 80% na wyprodukowanie jednej sztuki (jednostki) wyrobu. Druga zmiana to wydłużenie z jednego dnia do jednego tygodnia *Czasu na wydanie surowca*,

aby obniżyć *Maksymalne zużycie surowca*. Przy krótszym czasie, *Wymagane zużycie surowca* jest w całym przedziale czasu mniejsze od maksymalnego tempa wydawania surowca, więc strumień *Zużycia surowca* jest równy jego zużyciu wynikającemu z planu produkcyjnego. Takie warunki zachowano w symulacji 91. W jej przypadku ilość przewidywanych oraz rzeczywistych odpadów z niewykorzystanego surowca będzie zawsze jednakowa.

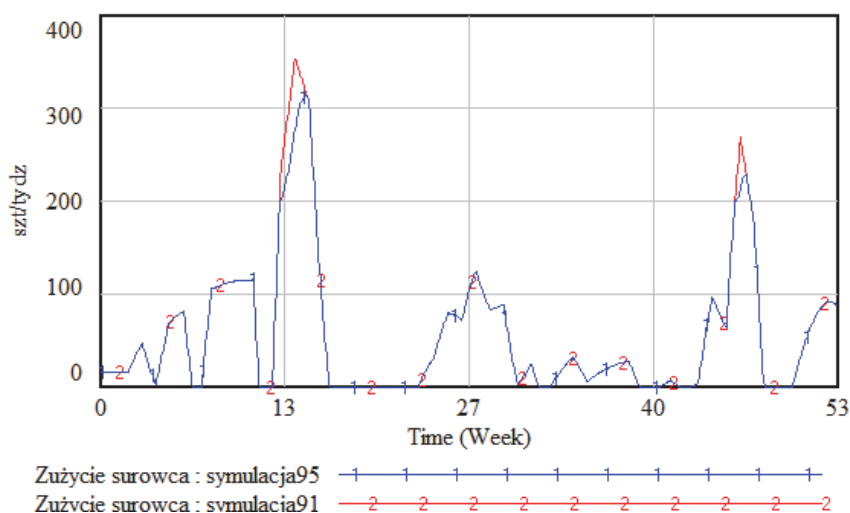


Rys. 4.50. Porównanie przebiegów modelu zaopatrzenie – produkcja – zbył z różnymi wartościami *Procenta niewykorzystanego surowca z jednej jego sztuki*

Źródło: opracowanie własne.

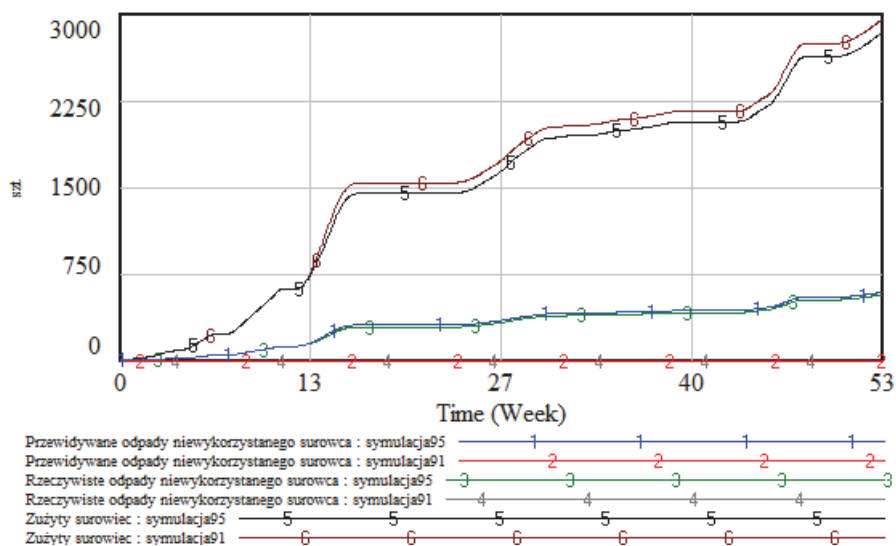
Na rysunku 4.50 widać wartości *Maksymalnego zużycia surowca* dla obu symulacji. *Wymagane zużycie surowca* dla symulacji95 zostanie ograniczone, a w efekcie uzyskane *Zużycie surowca*. Jego przebiegi przedstawiono na rysunkach 4.50 i 4.51. Ostatni z rysunków, 4.52, prezentuje m.in. wykres poziomu *Zużytego surowca*. W przypadku symulacji 91, gdy *Procent niewykorzystanego surowca z jednej jego sztuki* wynosi zero, zarówno *Rzeczywiste*, jak i *Przewidywane odpady niewykorzystanego surowca* są równe zeru w całym przedziale czasu. Odpady nie powstają, ponieważ cały zamawiany surowiec jest zużywany. Może tak być np. w montażu, gdy żaden z elementów nie ulega uszkodzeniu. Gdyby nie zmniejszono *Czasu na wydanie surowca*, zużycie przewidywane i rzeczywiste dla obu symulacji byłyby równe sobie, niezależnie od wielkości *Procenta niewykorzystanego surowca z jednej jego sztuki*. Możemy przyjąć, że na rysunku 4.52 wartości faktycznie zużytego surowca dla symulacji 91 ilustrują zarazem poziom *Wymaganego zużycia surowca* dla symulacji 95. Widać wtedy,

że ilość przewidywanego odpadu nie musi być równa, a może być mniejsza od ilości odpadu, który rzeczywiście powstanie. Należy jednak pamiętać, że procent ten przyjmujemy według szacunków, stąd mogą pojawiać się pewne odchylenia między wynikiem uzyskanym z symulacji a ilością odpadu powstającym w istniejącym przedsiębiorstwie.



Rys. 4.51. Porównanie przebiegów modelu zaopatrzenie – produkcja – zbył z różnymi wartościami *Procenta niewykorzystanego surowca z jednej jego sztuki*

Źródło: opracowanie własne.



Rys. 4.52. Porównanie przebiegów modelu zaopatrzenie – produkcja – zbył z różnymi wartościami *Procenta niewykorzystanego surowca z jednej jego sztuki*

Źródło: opracowanie własne.

5. ZAKOŃCZENIE

Zbudowano łącznie osiem różnych modeli oraz za ich pomocą przeprowadzono dwadzieścia osiem symulacji. Poniżej znajduje się ich poglądowe zestawienie wraz z krótkimi opisami.

1. model 1

- Podstawowy model symulacyjny produkcja – zbyt
- Korekta tylko od *Wyrobow gotowych – Korekta produkcji*
- *Zamówienia* jako pojedynczy skok
- Przeprowadzone symulacje:
 - **symulacja 1**
 - Symulacja podstawowa

2. model 2

- Model symulacyjny produkcja – zbyt
- Rozwinięcie modelu 1
- *Zamówienia* zmieniające się w każdym tygodniu
- Opcjonalne *Dodatkowe zamówienia*
- Przeprowadzone symulacje:
 - **symulacja 2**
 - Ograniczona wartość minimalna *Rozpoczęcia produkcji* – jedynie wartości większe lub równe zeru
 - **symulacja 3**
 - Brak ograniczenia wartości minimalnej *Rozpoczęcia produkcji* – definicja jak w symulacji 1

3. model 3

- Model symulacyjny produkcja – zbyt
- Dodana *Korekta produkcji w toku* – obecne obie korekty
- Rozwinięcie modelu 1
- Zmieniona wartość początkowa *Produkcji w toku*
- Po zbudowaniu modelu 5 i przeprowadzeniu symulacji 6 dodany zasób *Ilość dostarczonych sztuk wyrobu* zdefiniowany w taki sam sposób, jak w modelu 5
- Przeprowadzone symulacje:
 - **symulacja 4**
 - Warunki jak w symulacji 2, ale z dodaną *Korektą produkcji w toku*

4. model 4

- Model symulacyjny produkcja – zbyt
- Odjęta *Korekta produkcji* – obecna tylko *Korekta produkcji w toku*
- Przeprowadzone symulacje:

- **symulacja 5**
 - *Czas bezpiecznego pokrycia = 2 (Zapas wyrobów gotowych wyznaczany na dwa tygodnie)*
- **symulacja 51**
 - *Czas bezpiecznego pokrycia = 0 (Brak zapasu wyrobów gotowych)*
- **symulacja 52**
 - *Czas bezpiecznego pokrycia = 1 (Zapas wyrobów gotowych wyznaczany na 1 tydzień)*
- **symulacja 53**
 - *Czas bezpiecznego pokrycia = 0,5 (Zapas wyrobów gotowych wyznaczany na pół tygodnia)*
- **symulacja 54**
 - *Zmiana struktury modelu – skasowany Czas bezpiecznego pokrycia oraz strzałka od Zamówień do Poziomu wyrobów gotowych*
 - *Poziom wyrobów gotowych = 10 (Zapas wyrobów gotowych wyznaczany na stałą wartość dziesięciu sztuk)*

5. model 5

- Model symulacyjny produkcja – zbyt
- Obecne obie korekty (*Korekta produkcji i Korekta produkcji w toku*)
- Rozwinięcie modelu 3
- Uwzględnienie niezrealizowanych zamówień
- Przeprowadzone symulacje:
 - **symulacja 6**
 - *Warunki jak w symulacji 4*

6. model 6

- Podstawowy model symulacyjny zaopatrzenie – produkcja – zbyt
- Rozwinięcie modelu 5
- Dodane ograniczenie *Rozpoczęcia produkcji* wynikające z stałej dostępności przedmiotów pracy
- Przeprowadzone symulacje:
 - **symulacja 71**
 - *Produkcja wynikająca z dostępnych surowców = 50*
 - **symulacja 72**
 - *Produkcja wynikająca z dostępnych surowców = 100*
 - **symulacja 73**
 - *Produkcja wynikająca z dostępnych surowców = 150*
 - **symulacja 74**
 - *Produkcja wynikająca z dostępnych surowców = 200*
 - **symulacja 75**
 - *Produkcja wynikająca z dostępnych surowców = 250*

7. model 7

- Model symulacyjny zaopatrzenie – produkcja – zbył
- Rozwinięcie modelu 5
- Dodane ograniczenie *Rozpoczęcia produkcji* wynikające ze zmiennej dostępności przedmiotów pracy
- Uwzględnienie możliwości wystąpienia jednokrotnego niedostarczenia dostaw w wybranym momencie i o dowolnym czasie trwania
- Przeprowadzone symulacje:
 - **symulacja 81**
 - *Czas na korektę zapasu surowca* = 1
 - **symulacja 82**
 - *Symulacja będąca punktem odniesienia dla symulacji w modelach 7 i 8*
 - *Zużycie surowca na jednostkę wyrobu* = 1
 - *Czas na wydanie surowca* = 0,2
 - *Czas na korektę zapasu surowca* = 4
 - *Czas utrzymania zapasu surowca* = 1
 - *Wyroby gotowe wyprodukowane przy zapasie minimalnym* = 200
 - *Czas wystąpienia braku przybycia dostawy* = 0
 - *Czas trwania braku przybycia dostawy* = 0
 - **symulacja 83**
 - *Zużycie surowca na jednostkę wyrobu* = 2
 - **symulacja 84**
 - *Czas na wydanie surowca* = 0,1
 - **symulacja 85**
 - *Czas na wydanie surowca* = 1
 - **symulacja 86**
 - *Czas utrzymania zapasu surowca* = 0,5
 - **symulacja 87**
 - *Czas utrzymania zapasu surowca* = 2
 - **symulacja 88**
 - *Czas wystąpienia braku przybycia dostawy* = 13
 - *Czas trwania braku przybycia dostawy* = 7

8. model 8

- Ostateczny model symulacyjny zaopatrzenie – produkcja – zbył
- Rozwinięcie modelu 7
- Dodane ograniczenie *Rozpoczęcia produkcji* wynikające ze zmiennej dostępności technicznych środków pracy
- Dodane ograniczenie *Rozpoczęcia produkcji* wynikające ze zmiennej dostępności siły roboczej

- Uwzględnienie obliczania przewidzianej i rzeczywistej ilości niewykorzystanego surowca
- Przeprowadzone symulacje:
 - **symulacja 91**
 - *Symulacja będąca punktem odniesienia dla symulacji w modelu 8*
 - *Produkcja wynikająca z dostępnych środków pracy = 200*
 - *Produkcja wynikająca z dostępnej siły roboczej = 200*
 - *Procent niewykorzystanego surowca z jednej jego sztuki = 0*
 - *Wartości pozostałych stałych jak w symulacji 82*
 - **symulacja 92**
 - *Czas wystąpienia braku przybycia dostawy = 13*
 - *Czas trwania braku przybycia dostawy = 7*
 - **symulacja 93**
 - *Produkcja wynikająca z dostępnej siły roboczej = 150*
 - **symulacja 94**
 - *Czas wystąpienia braku przybycia dostawy = 13*
 - *Czas trwania braku przybycia dostawy = 7*
 - *Produkcja wynikająca z dostępnej siły roboczej = 150*
 - **symulacja 95**
 - *Czas na wydanie surowca = 1*
 - *Procent niewykorzystanego surowca z jednej jego sztuki = 0,2*

Opracowane modele powstawały kolejno, jako rozbudowanie podstawowego modelu zaczerpniętego z literatury. Dodawane czynniki miały na celu zwiększyć możliwości symulacji procesów zachodzących w przedsiębiorstwie i wpływających na jego zdolność produkcyjną. Oparto się na modelach innych autorów, między którymi znaleziono podobieństwa, wykorzystując je lub zmieniając, by dopasować do założeń tworzonego modelu. Symulacje przeprowadzone za pomocą opracowanych modeli pozwalały na bieżąco weryfikować sposób tworzenia modelu. Analiza porównawcza ich wyników miała na celu walidację każdego kolejnego modelu oraz przybliżenie czytelnikowi wpływu działania poszczególnych zmiennych i wartości stałych użytych parametrów.

Ostatni z modeli – model zaopatrzenia – produkcji – zbytu o nazwie model 8 działa w sposób zgodny z przewidywaniami, dlatego uznano go za poprawny. Zawiera części odpowiedzialne za dostawy, produkcję, zaopatrzenia w przedmioty pracy ze zmienną wartością wynikającego z niego możliwego tempa produkcji. Uwzględniona jest realizacja zaległych zamówień, stałe ograniczenia

tempa rozpoczęcia produkcji wynikające z dostępnych technicznych środków pracy oraz siły roboczej. Zastosowano korekty wielkości produkcji obserwując poziomy produkcji wyrobów będących w aktualnej produkcji oraz już wyprodukowanych. Przedstawione zostały warianty modeli, w których występuje tylko jedna z tych korekt, co daje możliwość modyfikacji modelu do zastosowania go w przedsiębiorstwie stosującym tylko jedną z nich. Jednocześnie zaprezentowano, że zamówienia są realizowane z większą terminowością przy użyciu obu korekt.

Zamodelowano przedsiębiorstwo małoseryjne, gdzie napływ zamówień następuje co tydzień. Zmiany w ilości zamawianych sztuk mogą być większe lub mniejsze, w pewnych przedziałach czasu zamodelowano również ustalenie ilości zamawianego wyrobu oraz brak popytu. Pokazano zarazem możliwość ustalenia zamówień na stałym poziomie, co pozwala na dostosowanie modelu do przedsiębiorstwa o produkcji masowej. W części modelu, odpowiedzialnej za wyliczenia ilości odpadów powstających z niewykorzystanego surowca, zauważono sposób dostosowania wartości parametru do wykorzystania modelu w przedsiębiorstwie zajmującym się nie tylko produkcją, lecz także montażem.

Model został opracowany na podstawie literatury, bez dostosowywania go do konkretnego przedsiębiorstwa. Został jednak stworzony z myślą do stosowania w produkcji małoseryjnej. Wymagane jest, by został on przetestowany w warunkach wielu przedsiębiorstw tego typu. Po odpowiednim dopasowaniu modelu, umożliwi to sprawdzenie jego działania w konfrontacji z rzeczywistym zachowaniem systemów takiej klasy.

Model zawiera uproszczenia i nie wzięto pod uwagę szeregu możliwych czynników oraz zdarzeń. Są to elementy, które można dodawać do już opracowanego modelu. W modelu produkcji nie uwzględniono możliwości anulowania zamówienia. Można za to przyjąć, że zdarzenie takie ma miejsce, gdy wartość zamówienia na dany tydzień wynosi zero. Innym mankamentem jest brak uwzględnienia wysyłki wyrobów do klientów w partiach transportowych. Czas z jakim dostarczany jest produkt, zależy od możliwości produkcyjnych przedsiębiorstwa oraz czasu potrzebnego na jego przygotowanie do wysyłki oraz dostawę. Nie uwzględniono, że może wystąpić ewentualny czas opóźnienia dostarczenia produktu do klienta, gdy ilość wyrobów gotowych do dostawy jest mniejsza niż partia transportowa. Można także rozwinąć model dodając ograniczenie pojemności magazynu surowca lub wyrobów gotowych, uwzględniając zwracane niewadliwe produkty lub występowanie braków produkcyjnych.

Nie ujęto w modelu również zmiennych wartości ograniczenia tempa rozpoczęcia produkcji wynikających z dostępnych technicznych środków pracy oraz siły roboczej. W kolejnych iteracjach można uwzględnić zmienną wydajność maszyn, uwzględniając takie zdarzenia jak awarie, przestoje, zaplanowane

przeglądy. Rozważając czynnik ludzki można wziąć pod uwagę liczbę pracowników produkcyjnych, średnią wydajność jednego pracownika, wpływ ich zaplanowanych i niezaplanowanych obecności w pracy, czas potrzebny na rekrutację i szkolenie nowych pracowników.

W modelu nie ujęto wpływu czynników energetycznych, środków finansowych i informacji. Stoi za tym szereg elementów i możliwości rozbudowywania modelu. Pod względem czynników energetycznych, należy model dostosować do ilości i typu danego zasilenia produkcji w przedsiębiorstwie. Mogące wystąpić zdarzenia to, m.in. zmniejszenie ilości dostarczanego medium, jego czasowy zanik, w skrajnych przypadkach niebezpieczeństwa wiążące się z awariami i wypadkami mogącymi wystąpić podczas jego eksploatacji (np. wyciek paliwa). Biorąc pod uwagę środki finansowe, należałoby rozważyć istnienie kapitału zamrożonego, możliwe wydatki wiążące się z produkcją (np. koszty utrzymania pracownika przez dany okres, koszty transportowe przypadające na partię transportową, koszty eksploatacji maszyn i urządzeń, koszty magazynowania itd.) oraz przychody (np. cena sprzedaży jednostki lub partii wyrobu). Przepływ informacji będzie istotny, gdy jest potrzeba rozbudowy modelu w celu szerszego spojrzenia na łańcuch dostaw. W tej pracy składa się on z trzech ogniw: dostawcy, producenta, klienta, jednak można zawrzeć istnienie hurtowników i detaliistów między producentem, a konsumentem. Każdy z nich posiada własny popyt i podaż, wiążący się z kolejnym ogniwem. Jak przedstawiono w przeglądzie literatury^{68,69}, współdzielenie informacji na ten temat poprawia dostosowanie się do spełnienia wymagań stawianych przez klienta danego ogniwu.

Rozważając aspekt zadowolenia klienta można również przyjąć jego miarę, ustalając współczynnik ilości wyrobów przez niego zamówionych, a dostarczonych, uwzględniając (lub nie) ewentualne opóźnienia dostawy. Na postrzeganie firmy przez klienta może wpływać to, czy firma dba o ekologię, czy nie. Jednym z takich wskaźników może być procent wyrobów wyeksploatowanych, które przedsiębiorstwo zbiera lub są do niej dostarczane, a następnie poddaje recyklingowi. Wyliczenie takiego współczynnika możliwe będzie jedynie w firmach, których produkty można poddać recyklingowi. Istnieje również możliwość rozbudowania modelu o zagospodarowanie odpadów zwrotnych, powstających wskutek produkcji i mogących być ponownie wykorzystane. Warto wziąć pod uwagę powstawanie odpadów uchwytnych i nieuchwytnych, zwłaszcza jeśli mamy do czynienia z odpadami niebezpiecznymi.

⁶⁸ M. Özbayrak, T.C. Papadopoulou, M. Akgun, *Systems dynamics modelling of a manufacturing supply chain system*, „Simulation Modelling Practice and Theory”, 2007, 15, ss. 1338-1355.

⁶⁹ Y. Feng, *System Dynamics Modeling for Supply Chain Information Sharing*, „Physics Procedia”, 2012, 25, ss. 1463-1469.

Model powstały w ramach pracy spełnia swoją funkcję. Pozwala prognozować podstawowe zachowania systemu produkcyjnego, stanowiąc jednocześnie podstawę do dostosowania go do konkretnego przedsiębiorstwa. Opracowany model może także służyć jako baza do dalszego rozwijania go celem badania wpływu bardziej szczegółowych czynników.

6. BIBLIOGRAFIA

1. Angerhofer B.J., Angelides M.C., *System dynamics modelling in supply chain management: research review*, Winter Simulation Conference, 2000, ss. 342-351.
2. Baran M., *Zastosowanie metody Dynamiki Systemów w przedsiębiorstwie odzieżowym*, [w:] Wybrane koncepcje i metody zarządzania początku XXI wieku, red. Wiesław Gonciarski i Piotr Zaskórski, Wojskowa Akademia Techniczna, Warszawa 2009, ss. 239-249.
3. Baran M., *Rozwinięcie symulacyjne modelu dostosowania zatrudnienia do potrzeb produkcyjnych przedsiębiorstwa alfa w konwencji dynamiki systemów*, Zeszyty Naukowe Politechniki Rzeszowskiej – Zarządzanie i Marketing, 2010, 17 (4/2010), ss. 9-16.
4. Baran M., Stecko J., *Symulacyjny model gospodarki – przypadek przedsiębiorstwa fotosystem*, Humanities and Social Sciences, 2013, XVIII (2/2013), ss. 27-40.
5. Baran M., Stecko J., *Symulacyjny model produkcja – zbył w konwencji dynamiki systemów przypadek przedsiębiorstwa Fotosystem*, Modern Management Review, 2014, XIX/21 (1/2014), ss. 7-23.
6. Dębowski A., *Automatyka. Podstawy teorii*, Wydawnictwa Naukowo-Techniczne, Warszawa 2008.
7. Durlik I. *Inżynieria zarządzania. Strategia i projektowanie systemów produkcyjnych*, wyd. IV, t. 1, Agencja Wydawniczo-Poligraficzna „Placet”, Warszawa 1998.
8. Encyklopedia PWN, <http://encyklopedia.pwn.pl/haslo/system;3982198.html>, dostępu z dnia 27.09.2015 r.
9. Encyklopedia PWN, <http://encyklopedia.pwn.pl/haslo/symulacja-komputerowa;3982026.html>, dostępu z dnia 10.10.2015 r.
10. Encyklopedia PWN, <http://encyklopedia.pwn.pl/haslo/model;3942505.html>, dostępu z dnia 27.09.2015 r.
11. Feng Y., *System Dynamics Modeling for Supply Chain Information Sharing*, Physics Procedia, nr 25 (2012) ss. 1463-1469.
12. Fishman G.S., *Symulacja komputerowa. Pojęcia i metody*, Państwowe Wydawnictwo Ekonomiczne, Warszawa 1981.
13. Georgiadis P., Michaloudis Ch., *Real-time production planning and control system for job-shop manufacturing: A system dynamics analysis*, European Journal of Operational Research, nr 216 (2012) ss. 94-104.
14. Golroudbary S.R., Mojib Z.S., *System dynamics model for optimizing the recycling and collection of waste material in a closed-loop supply chain*, Simulation Modelling Practice and Theory, 2015, 53, ss. 88-102.
15. Gordon G., *Symulacja systemów*, Wydawnictwo Naukowo-Techniczne, Warszawa 1974.

16. Kaczorek T., *Teoria układów regulacji automatycznej*, wyd. II, Wydawnictwa Naukowo-Techniczne, Warszawa 1977.
17. Kibira D., Sanjay J., McLean Ch.R., *A System Dynamics Modeling Framework for Sustainable Manufacturing*, Proceedings of the 27th Annual System Dynamics Society Conference, 2009.
18. Kiyani B., Shahnazari-Shahrezaei P., Kazemipoor H., Fallah M., *Dynamic modeling to determine production strategies in order to maximize net present worth in small and medium size companies*, Journal of Industrial Engineering International, nr 6 (11) (2010), ss. 51-64.
19. Kortan J., *Podstawy ekonomiki i zarządzania przedsiębiorstwem*, Wydawnictwo C. H. Beck, Warszawa 1997.
20. Kramarz M., *Modelowanie podwykonawstwa w sieci dystrybucji z odroczoną produkcją*, Prace Naukowe Politechniki Warszawskiej – Transport, nr 84 (2012), ss. 55-67.
21. Krupa K., *Modelowanie, symulacja i prognozowanie. Systemy ciągłe*, Wydawnictwo Naukowo-Techniczne, Warszawa 2008.
22. Liwowski B., Kozłowski R., *Podstawowe zagadnienia zarządzania produkcją*, wyd. II poszerz, Oficyna a Wolters Kluwer business, Kraków 2007.
23. Łukaszewicz R., *Dynamika systemów zarządzania*, Państwowe Wydawnictwo Naukowe, Warszawa 1975.
24. Maciąg A., Pietroń R., Kukła S. *Prognozowanie i symulacja w przedsiębiorstwie*, Polskie Wydawnictwo Ekonomiczne, Warszawa 2013.
25. Minegishi S., Thiel D., *System dynamics modeling and simulation of a particular food supply chain*, Simulation Practice and Theory, nr 8 (2000), ss. 321-339.
26. Orcun S., Reha U., Kempf K., *Using system dynamics simulations to compare capacity models for production planning*, Winter Simulation Conference, 2006, ss. 1855-1862.
27. Özbayrak M., Papadopoulou T.C., Akgun M., *Systems dynamics modelling of a manufacturing supply chain system*, Simulation Modelling Practice and Theory, nr 15 (2007), ss. 1338-1355.
28. Pająk E., *Zarządzanie produkcją. Produkt, technologia, organizacja*, Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa 2006.
29. Pasternak K., *Zarys zarządzania produkcją*, Polskie Wydawnictwo Ekonomiczne, Warszawa 2005.
30. Piewthongngam K., Prasert V., Supachai P., Sawvapark Ch., Monchai D., *System dynamics modelling of an integrated pig production supply chain*, Biosystems Engineering, nr 127 (2014), ss. 24-40.
31. Poles R., *System Dynamics modelling of a production and inventory system for remanufacturing to evaluate system improvement strategies*, International Journal of Production Economics, nr 144 (2013), ss. 189-199.

32. Rydzak F., Chlebus E., *Dynamic Model Based Resilience Analysis in Production Systems*, Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, Wrocław 2008.
33. Senge P.M., *Piąta dyscyplina. Teoria i praktyka organizacji uczących się*, wyd. VI poszerz., Oficyna a Wolters Kluwer business, Warszawa 2012.
34. Sterman J.D., *Business Dynamics: Systems Thinking and Modeling for a Complex World*, Irwin/McGraw-Hill, Boston 2000.
35. Szatkowski K. (red.), *Nowoczesne zarządzanie produkcją. Ujęcie procesowe*, PWN, Warszawa 2014.
36. Vensim's help documentation. <http://www.vensim.com/documentation/index.html>, dostęp z dnia 06.02.2016 r.
37. Vlachos D., Georgiadis P., Iakovou E., *A system dynamics model for dynamic capacity planning of remanufacturing in closed-loop supply chains*, Computers & Operations Research, nr 34 (2007), ss. 367-394.
38. Xianjin Z., Mi Y., *System Dynamics Modeling for Customer-Production-Sale in Supply Chain*, International Conference on Management of Logistics and Supply Chain, 2006, ss. 461-465.
39. Zeigler B.P., *Teoria modelowania i symulacji*, Państwowe Wydawnictwo Naukowe, Warszawa 1984.
40. Żukowski P., *Model i symulacja dynamiki systemu zarządzania organizacją gospodarczą (ujęcie modelowe)*, t. 3, [w:] Rola przedsiębiorczości w aktywizacji gospodarczej, red. Ziolo Z., Rachwał T., Wydawnictwo Nowa Era, Warszawa – Kraków 2007, ss. 212-219.

Strony www producentów oprogramowania przywołanego w tekście (aktualizacja adresów: lipiec, 2016)

www.maplesoft.com/products/maplesim

www.wolfram.com/system-modeler

www.iseesystems.com

www.mathworks.com/products/simulink.html

www.powersimsolutions.com/powersimstudio.html

www.anylogic.com

vensim.com sysdyn.simantics.org

SPIS RYSUNKÓW

Rys. 1.1. Typy reakcji na prognozy popytu.....	9
Rys. 2.1. System gospodarczy.....	13
Rys. 2.2. Przykład związków między systemem produkcyjnym i innymi systemami przedsiębiorstwa.....	14
Rys. 2.3. Schemat blokowy zamkniętego układu sterowania.....	16
Rys. 3.1. Przykład struktury systemu.....	19
Rys. 3.2. Relacja system – otoczenie.....	20
Rys. 3.3. System ze sprzężeniem zwrotnym.....	22
Rys. 3.4. System dynamiczny.....	23
Rys. 4.1. Podstawowy model symulacyjny produkcja – zbyt.....	29
Rys. 4.2. Przebiegi podstawowego modelu produkcja – zbyt.....	30
Rys. 4.3. Przebiegi podstawowego modelu produkcja – zbyt.....	31
Rys. 4.4. Podstawowy model symulacyjny produkcja – zbyt ze zmianą <i>Zamówień</i>	33
Rys. 4.5. Przebiegi podstawowego modelu symulacyjnego produkcja – zbyt ze zmianą <i>Zamówień</i>	34
Rys. 4.6. Przebiegi podstawowego modelu symulacyjnego produkcja – zbyt ze zmianą <i>Zamówień</i>	35
Rys. 4.7. Porównanie przebiegów z i bez ograniczenia na <i>Rozpoczęciu produkcji</i>	36
Rys. 4.8. Porównanie przebiegów z i bez ograniczenia na <i>Rozpoczęciu produkcji</i>	37
Rys. 4.9. Model symulacyjny produkcja – zbyt z dodaną <i>Korektą produkcji w toku</i>	38
Rys. 4.10. Porównanie przebiegów z i bez <i>Korekty produkcji w toku</i>	39
Rys. 4.11. Model symulacyjny produkcja – zbyt bez <i>Korekty produkcji</i>	40
Rys. 4.12. Porównanie przebiegów z różnymi wariantami korekt.....	41
Rys. 4.13. Porównanie przebiegów z różnymi wariantami korekt.....	42
Rys. 4.14. Porównanie przebiegów z różnymi wariantami zapasów i korekt.....	43
Rys. 4.15. Porównanie przebiegów z różnymi wariantami zapasów i korekt.....	43
Rys. 4.16. Model symulacyjny produkcja – zbyt z uwzględnieniem <i>Niezrealizowanych zamówień</i>	46
Rys. 4.17. Porównanie przebiegów z i bez uwzględnienia <i>Niezrealizowanych zamówień</i>	47
Rys. 4.18. Porównanie przebiegów z i bez uwzględnienia <i>Niezrealizowanych zamówień</i>	48
Rys. 4.19. Model z stałym ograniczeniem produkcji przez ilość dostępnych surowców.....	51
Rys. 4.20. Porównanie przebiegów z i bez ograniczenia <i>Produkcji wynikającej z dostępnych surowców</i>	52
Rys. 4.21. Porównanie przebiegów z i bez ograniczenia <i>Produkcji wynikającej z dostępnych surowców</i>	54
Rys. 4.22. Model ze zmiennym ograniczeniem produkcji przez ilość dostępnych surowców zaopatrzenia w przedmioty pracy – produkcja – zbyt.....	56
Rys. 4.23. Model ze zmiennym ograniczeniem produkcji przez ilość dostępnych surowców.....	57
Rys. 4.24. Porównanie przebiegów bez i z różnymi rodzajami ograniczenia <i>Produkcji wynikającej z dostępnych surowców</i>	62

Rys. 4.25. Porównanie przebiegów bez i z różnymi rodzajami ograniczenia <i>Produkcji wynikającej z dostępnych surowców</i>	62
Rys. 4.26. Porównanie przebiegów z różnymi wartościami stałych przy zmiennej <i>Produkcji wynikającej z dostępnych surowców</i>	63
Rys. 4.27. Porównanie przebiegów z różnymi wartościami stałych przy zmiennej <i>Produkcji wynikającej z dostępnych surowców</i>	64
Rys. 4.28. Porównanie przebiegów z różnymi wartościami stałych przy zmiennej <i>Produkcji wynikającej z dostępnych surowców</i>	65
Rys. 4.29. Porównanie przebiegów z różnymi wartościami stałych przy zmiennej <i>Produkcji wynikającej z dostępnych surowców</i>	65
Rys. 4.30. Porównanie przebiegów z różnymi wartościami stałych przy zmiennej <i>Produkcji wynikającej z dostępnych surowców</i>	66
Rys. 4.31. Porównanie przebiegów z różnymi wartościami stałych przy zmiennej <i>Produkcji wynikającej z dostępnych surowców</i>	66
Rys. 4.32. Porównanie przebiegów z różnymi wartościami stałych przy zmiennej <i>Produkcji wynikającej z dostępnych surowców</i>	67
Rys. 4.33. Porównanie przebiegów z różnymi wartościami stałych przy zmiennej <i>Produkcji wynikającej z dostępnych surowców</i>	68
Rys. 4.34. Porównanie przebiegów z różnymi wartościami stałych przy zmiennej <i>Produkcji wynikającej z dostępnych surowców</i>	68
Rys. 4.35. Porównanie przebiegów z różnymi wartościami stałych przy zmiennej <i>Produkcji wynikającej z dostępnych surowców</i>	69
Rys. 4.36. Porównanie przebiegów z różnymi wartościami stałych przy zmiennej <i>Produkcji wynikającej z dostępnych surowców</i>	70
Rys. 4.37. Porównanie przebiegów z różnymi wartościami stałych przy zmiennej <i>Produkcji wynikającej z dostępnych surowców</i>	71
Rys. 4.38. Porównanie przebiegów z różnymi wartościami stałych przy zmiennej <i>Produkcji wynikającej z dostępnych surowców</i>	71
Rys. 4.39. Porównanie przebiegów z różnymi wartościami stałych przy zmiennej <i>Produkcji wynikającej z dostępnych surowców</i>	72
Rys. 4.40. Model zaopatrzenie – produkcja – zbyt	73
Rys. 4.41. Ograniczenia wielkości produkcji	77
Rys. 4.42. Obliczanie przewidywanych i faktycznie powstałych ilości odpadów niewykorzystanego surowca	78
Rys. 4.43. Porównanie przebiegów modelu zaopatrzenie – produkcja – zbyt z różnymi wartościami ograniczeń <i>Rozpoczęcia produkcji</i>	81
Rys. 4.44. Porównanie przebiegów modelu zaopatrzenie – produkcja – zbyt z różnymi wartościami ograniczeń <i>Rozpoczęcia produkcji</i>	82
Rys. 4.45. Porównanie przebiegów modelu zaopatrzenie – produkcja – zbyt z różnymi wartościami ograniczeń <i>Rozpoczęcia produkcji</i>	83
Rys. 4.46. Porównanie przebiegów modelu zaopatrzenie – produkcja – zbyt z różnymi wartościami ograniczeń <i>Rozpoczęcia produkcji</i>	83
Rys. 4.47. Porównanie przebiegów modelu zaopatrzenie – produkcja – zbyt z różnymi wartościami ograniczeń <i>Rozpoczęcia produkcji</i>	84
Rys. 4.48. Porównanie przebiegów modelu zaopatrzenie – produkcja – zbyt z różnymi wartościami ograniczeń <i>Rozpoczęcia produkcji</i>	85
Rys. 4.49. Porównanie przebiegów modelu zaopatrzenie – produkcja – zbyt z różnymi wartościami ograniczeń <i>Rozpoczęcia produkcji</i>	85

Rys. 4.50. Porównanie przebiegów modelu zaopatrzenie – produkcja – zbyt z różnymi wartościami <i>Procenta niewykorzystanego surowca</i> <i>z jednej jego sztuki</i>	86
Rys. 4.51. Porównanie przebiegów modelu zaopatrzenie – produkcja – zbyt z różnymi wartościami <i>Procenta niewykorzystanego surowca</i> <i>z jednej jego sztuki</i>	87
Rys. 4.52. Porównanie przebiegów modelu zaopatrzenie – produkcja – zbyt z różnymi wartościami <i>Procenta niewykorzystanego surowca</i> <i>z jednej jego sztuki</i>	87

SPIS TABEL

Tabela 1.1. Klasyfikacja badań i rozwoju w modelowaniu dynamiki systemów w zarządzaniu łańcuchem dostaw	6
Tabela 2.1. Elementy strukturalnych modeli symulacyjnych.....	25
Tabela 4.1. Zmienne i stałe w podstawowym modelu produkcja – zbył.....	29
Tabela 4.2. Zmienne i stałe w podstawowym modelu produkcja – zbył ze zmianą <i>Zamówień</i>	33
Tabela 4.3. Zmienne i stałe w modelu produkcja – zbył z dodaną <i>Korektą produkcji w toku</i>	38
Tabela 4.4. Zmienna w modelu produkcja – zbył bez <i>Korekty produkcji</i>	40
Tabela 4.5. Zmienne i stałe w modelu produkcja – zbył z uwzględnieniem <i>Niezrealizowanych zamówień</i>	46
Tabela 4.6. Zmienne i stałe w podstawowym modelu z ograniczeniem produkcji przez ilość dostępnych surowców	50
Tabela 4.7. Zmienne i stałe w zmodyfikowanym modelu z ograniczeniem produkcji przez ilość dostępnych surowców	57
Tabela 4.8. Wartości stałych w symulacjach w zmodyfikowanym modelu z ograniczeniem produkcji przez ilość dostępnych surowców.....	61
Tabela 4.9. Zmienne i stałe w modelu zaopatrzenie – produkcja – zbył.....	74
Tabela 4.10. Wartości stałych w symulacjach w zmodyfikowanym modelu z ograniczeniem produkcji przez ilość dostępnych surowców.....	80

